

3100000011436

3964

TUGAS AKHIR (NA 1701)

ANALISA PENGARUH FREKUENSI PEMBEBANAN TERHADAP CRACK PROPAGATION PADA PELAT BERPENEGAR

RSPe
620.112.6
Her
a-1
1998



Oleh :

HENNY SETYA HERWAHYUNI
4195.100.502

PERPUSTAKAAN
ITS

Tgl. Terbit	25-4-99
Tgl. Diterima	11
No. Agenda Prp.	8537

JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1998

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Surabaya, Agustus 1998

Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing



(Ir. Soeweify, M.Eng)
Nip. 130.368.597

Mengetahui dan Menyetujui

Dosen Pembimbing



(Ir. Asihar Imron, M.Sc, M.S.E, P.E.D.)
Nip. 130.687.432



JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS

SURAT KEPUTUSAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

No. : 142 /PT12.FTK2/M/199 7

Nama Mahasiswa : Henny Setya H.
Nomor Pokok : 4195100502
Tanggal diberikan tugas : 01. Nopember. 1997.
Tanggal selesai tugas : 15. Pebruari. 1998.
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Asjhar Imron, MSC, MSE, PED...
2. Ir. Soewefy, M.Eng.

Uraian / judul tugas akhir yang diberikan :

ANALISA PENGARUH FREKUENSI PEMBEBANAN TERHADAP CRACK PROPAGATION PADA PLAT -
BERPENEGAR

sOn

Surabaya, 24 N o p e m b e r 199 7
Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS

K e t u a,



Tembusan :

1. Yth. Dekan FTK-ITS.
2. Yth. Dosen Pembimbing.
3. Arsip.

Koestowo Sastro Wiyono.

NIP. 130 687 430.

linal halaman berikutnya

ABSTRAK

Struktur yang mempunyai retak bila mendapat beban dinamis akan menjalar dengan kecepatan yang tertentu hingga terjadi kegagalan. Dalam beberapa analisa penjalaran retak ini dipengaruhi beberapa parameter beban yang salah satunya adalah frekuensi beban.

Kelelahan terdiri dari tiga tahapan utama yaitu inisiasi retak, penjalaran retak dan kepatahan akhir. Dengan pemikiran bahwa inisiasi akan segera berlangsung dengan adanya cacat awal dan bahwa kepatahan akhir adalah suatu keadaan instabilitas yang tidak dapat ditahan, maka perhatian utama akan tertuju pada penjalaran retak. Semakin lambat penjalaran retak, maka umur struktur akan lebih panjang.

Dalam tugas akhir ini dilakukan pengujian empiris mengenai pengaruh penahanan yang ditimbulkan penegar yang terletak arah melintang retak yang terbukti memperlambat lajunya penjalaran yang pada akhirnya memperpanjang umur struktur.

Untuk membuktikan pengaruh perubahan frekuensi beban terhadap laju penjalaran retak dilakukan di laboratorium, dengan menentukan terlebih dulu beban yang akan dipergunakan dalam hal ini perhitungan dilakukan bantuan software MSC/NASTRAN.

Hasil pengujian dinyatakan dalam bentuk diagram laju penjalaran retak terhadap rentang faktor intensitas tegangan yang menunjukkan pengaruh perubahan kenaikan frekuensi beban dan juga pengaruh dengan adanya penambahan penegar terhadap lajunya perambatan retak.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT karena terselesaikan tugas akhir ini, yang semata-mata semua ini hanyalah atas kehendak-Nya.

Tugas akhir dengan judul “ANALISA PENGARUH FREKUENSI PEMBEBANAN TERHADAP CRACK PROPAGATION PADA PELAT BERPENEGAR” disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, ITS Surabaya guna melengkapi prasyarat kesarjanaan.

Selanjutnya penulis menyampaikan terima kasih yang mendalam kepada:

1. Bapak, ibu serta saudaraku, yang telah memberikan dorongan materiil maupun moril hingga terselesaikannya tulisan ini.
2. Bapak Ir. Soewefy, M.Eng., dan Bapak Ir. Asjhar Imron, M.Sc., M.S.E., P.E.D., selaku dosen pembimbing atas kebaikan memberi bimbingan dalam menyelesaikan tulisan ini.
3. Bapak Ir. Daniel M. Rosyid, M.Sc., Ph.D., selaku Kepala Program Studi Pasca Sarjana Teknik Kelautan ITS Surabaya atas ijinnya untuk mempergunakan fasilitas Laboratorium Komputer Pasca Sarjana.
4. Bapak Ir. Chriswanto Santoso M.Sc., atas kebaikan memberikan bimbingan dalam penggunaan Software MSC/NASTRAN.

5. Bapak Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Jurusan Teknik Kelautan dan Bapak Ir. Rudy Waluyo yang bersedia memberikan pinjaman manual book MSC/NASTRAN.
6. Bapak Ir. Koestowo dan Bapak Ir. Andjar Soeharto selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan ITS Surabaya.
7. Seluruh pimpinan dan karyawan Laboratorium konstruksi dan bengkel produksi FTK-ITS antara lain : Bapak Ir. P. Andrianto, Bapak Mudjito, Mas Naryo, Mas Didik, Pak Yanto, dan Pak Hardiman yang telah banyak membantu selama pengujian.
8. Serta semua pihak yang telah membantu penulis hingga terselesaikannya penyusunan Tugas Akhir ini.

Akhirnya penulis menyadari bahwa tulisan ini jauh dari sempurna karena itu kritik dan saran sangat dibutuhkan untuk mengembangkan penelitian selanjutnya. Meskipun hanya setetes air di lautan semoga tulisan ini bermanfaat bagi kita semua.

Surabaya, Agustus 1998

Penulis

DAFTAR ISI

PENGESAHAN

SK TUGAS AKHIR

ABSTRAK

KATA PENGANTAR

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

DAFTAR NOTASI

DAFTAR LAMPIRAN

BAB I PENDAHULUAN

- | | | |
|------|-----------------------|-------|
| 1.1. | Tinjauan Umum | I - 1 |
| 1.2. | Tujuan Penulisan | I - 3 |
| 1.3. | Batasan Masalah | I - 3 |
| 1.4. | Metodologi Pembahasan | I - 4 |

BAB II KELELAHAN MATERIAL

- | | | |
|--------|-------------------------------------|--------|
| 2.1. | Tinjauan Umum | II - 1 |
| 2.2. | Pengertian Dasar Kelelahan Material | II - 2 |
| 2.3. | Perkiraan Umur Lelah | II - 4 |
| 2.4. | Proses Kelelahan Material | II - 5 |
| 2.4.1. | Slip Berulang | II - 6 |

2.4.2. Nukleasi Retak	II - 6
2.4.3. Pertumbuhan Retak Mikro	II - 7
2.4.4. Pertumbuhan Retak Makro	II - 8
2.4.5. Kegagalan Akhir	II - 10
2.4.5.1. Kepecahan Cleavage	II - 11
2.4.5.2. Pertumbuhan Ductile	II - 12
2.5. Mekanisme Kelelahan Material	
2.5.1. Permulaan Retak Mikro	II - 13
2.5.2. Pertumbuhan Retak dan Striation	II - 19
BAB III PENJALARAN RETAK	
3.1 Tinjauan Umum	III - 1
3.2 Konsep Dasar Fracture Mechanic	III - 2
3.2.1. Jenis Retak dan Modus Bukaannya Retak	III - 2
3.2.2. Faktor Intensitas tegangan	III - 5
3.2.3. Plastisitas pada Ujung Retak	III - 9
3.2.4. Fracture Toughness	III - 12
3.3. Penjalaran Retak Kelelahan	III - 15
3.3.1. Grafik Penjalaran Retak Kelelahan	III - 15
3.3.2. Daerah Pertumbuhan Retak Lelah di Tengah	III - 18
3.4. Hubungan Penjalaran Retak dg Faktor Intensitas Tegangan	III - 23
BAB IV BEBAN DINAMIS	
4.1. Tinjauan Umum	IV - 1

4.2.	Getaran	IV - 3
4.2.1.	Frekuensi Natural	IV - 3
4.2.2.	Getaran Paksa dengan Gaya Eksitasi	IV - 4
4.3.	Parameter Beban Dinamis	IV - 8

BAB V PERSIAPAN DAN PELAKSANAAN PENGUJIAN

5.1.	Tinjauan Umum	V - 1
5.2.	Pengujian Tarik	V - 2
5.2.1.	Karakteristik Pengujian	V - 2
5.2.2.	Standart Spesimen	V - 3
5.2.3.	Prosedur dan Pengujian	V - 4
5.2.4.	Hasil Pengujian	V - 7
5.3.	Kalibrasi Beban	V - 7
5.4.	Pengujian Kelelahan	V - 9
5.4.1.	Karakteristik Pengujian	V - 9
5.4.2.	Standart Spesimen	V - 9
5.4.3.	Prosedur dan Pengujian	V - 11
5.4.4.	Hasil Pengujian	V - 13

BAB VI HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISA

6.1.	Tinjauan Umum	VI - 1
6.2.	Pengolahan Data	VI - 2
6.2.1.	Perhitungan Laju Penjalaran Retak	VI - 2
6.2.2.	Penentuan Faktor Intensitas Tegangan	VI - 5

6.3. Analisa Diagram Hasil Perhitungan

VI - 11

BAB VII KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram timbulnya retak kecil	II - 8
Gambar 2.2	Diagram pengamatan ukuran daerah retak	II - 9
Gambar 2.3	Kepecahan cleavage dan ductile	II - 11
Gambar 2.4	Penjalaran retak melalui butiran-butiran	II - 12
Gambar 2.5	Skema kegagalan deformasi geser murni logam	II - 13
Gambar 2.6	Skema penggabungan voids oleh slip	II - 14
Gambar 2.7	Model microcrack pada slip band	II - 16
Gambar 2.8	Nucleation microcrack pada slip band	II - 18
Gambar 2.9	Skema sistem slip yang berperan terhadap Pertambahan retak	II - 19
Gambar 2.10	Skema tahap pertumbuhan retak	II - 20
Gambar 2.11	Skema model plastisitas mikro dan striation	II - 21
Gambar 3.1	Through crack dan part through crack	III - 3
Gambar 3.2	Modus bukaan retak	III - 3
Gambar 3.3	Diagram retak pada plat infinit	III - 7
Gambar 3.4	Skema daerah plastis dan daerah elastis	III - 10
Gambar 3.5	Distribusi tegangan sepanjang sumbu X	III - 10
Gambar 3.6	Skema bentuk daerah plastis sepanjang tebal spesimen pada ujung retak	III - 12
Gambar 3.7	Skema penurunan struktur	III - 13
Gambar 3.8	Diagram fracture toughnees fungsi ketebalan	III - 14

Gambar 3.9	Kurva da/dN terhadap ΔK	III – 16
Gambar 3.10	Langkah penentuan da/dN	III - 18
Gambar 3.11	Skema signoidal laju penjalaran retak	III - 19
Gambar 3.12	Diagram laju penjalaran retak terhadap rentang intensitas tegangan	III - 22
Gambar 3.13	Hubungan antara faktor intensitas tegangan Dengan laju penjalaran retak	III - 24
Gambar 4.1	Hubungan gaya tarik statis dengan displasemen	IV - 4
Gambar 4.2	Skema getaran paksa	IV - 6
Gambar 4.3	Hubungan magnificant factor dengan frekuensi	IV - 7
Gambar 4.4	Diagram bentuk-bentuk beban dinamis	IV - 9
Gambar 5.1	Spesimen uji tarik ASTM E-8	V - 3
Gambar 5.2	Penentuan yield strength dengan metoda offset	V - 5
Gambar 5.3	Grafik kalibrasi beban	V - 8
Gambar 5.4	Spesimen middle tension	V - 10
Gambar 5.5	Grafik bentuk gelombang beban siklis	V - 12
Gambar 6.1	Grafik hubungan $\log da/dN$ & $\log \Delta K$ spesimen I	VI - 13
Gambar 6.2	Grafik hubungan $\log da/dN$ & $\log \Delta K$ spesimen II	VI - 13
Gambar 6.3	Grafik hubungan $\log da/dN$ & $\log \Delta K$ spesimen I,II	VI - 14
Gambar 6.4	Grafik hubungan $\log da/dN$ & $\log \Delta K$ spesimen III	VI - 15
Gambar 6.5	Grafik hubungan $\log da/dN$ & $\log \Delta K$ spesimen IV	VI -15
Gambar 6.6	Grafik hubungan $\log da/dN$ & $\log \Delta K$ spesimen III,IV	VI - 16

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1 Hasil pengukuran panjang retak spesimen I	V – 14
Tabel 5.2 Hasil pengukuran panjang retak spesimen II	V - 14
Tabel 5.3 Hasil pengukuran panjang retak spesimen III	V - 15
Tabel 5.4 Hasil pengukuran panjang retak spesimen IV	V - 15
Tabel 6.1 Perhitungan laju penjalaran retak spesimen I	VI – 3
Tabel 6.2 Perhitungan laju penjalaran retak spesimen II	VI - 3
Tabel 6.3 Perhitungan laju penjalaran retak spesimen III	VI - 4
Tabel 6.4 Perhitungan laju penjalaran retak spesimen IV	VI - 4
Tabel 6.5 Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen I	VI - 6
Tabel 6.6 Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen II	VI - 6
Tabel 6.7 Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen III	VI - 7
Tabel 6.8 Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen IV	VI - 7
Tabel 6.9 Perhitungan log da/dN dan log ΔK spesimen I	VI - 8
Tabel 6.10 Perhitungan log da/dN dan log ΔK spesimen II	VI - 9
Tabel 6.11 Perhitungan log da/dN dan log ΔK spesimen III	VI - 9
Tabel 6.12 Perhitungan log da/dN dan log ΔK spesimen IV	VI - 10

DAFTAR NOTASI

a	=	Panjang retak
a_0	=	Panjang retak awal
a_n	=	Jarak ujung retak dengan garis tengah lubang pin
\dot{a}	=	Kecepatan retak
α	=	Rasio panjang retak dengan lebar
B	=	Tebal
C	=	Konstanta persamaan Paris-Erdogan
c	=	Koefisien redaman
CTOD	=	Displasemen bukaan ujung retak
da/dN	=	Laju kecepatan perambatan retak
Δ	=	Displasemen
Δa	=	Pertambahan panjang retak
ΔK	=	Rentang faktor intensitas tegangan
ΔN	=	Pertambahan siklus beban
ΔP	=	Rentang Beban
Δr	=	Panjang daerah plastis terbalik
$\Delta \sigma$	=	Rentang Tegangan
Δt	=	Pertambahan waktu
Δv	=	Distribusi diskontinuitas displasemen pada arah y
ΔW	=	Usaha

E	=	Modulus Young
E_{kin}	=	Energi Kinetis
ε	=	Regangan
$F(t)$	=	Gaya eksitasi
f_d	=	Gaya redaman
f_n	=	Frekuensi natural
f_s	=	Gaya pegas
G	=	Gaya pengendali retak
G_{arrest}	=	Gaya pengendali retak pada kondisi penahanan
G_{Ic}	=	Gaya pengendali retak kritis
K	=	Faktor intensitas tegangan
K_c	=	Fracture Toughness
K_{min}	=	Faktor intensitas tegangan minimum
K_{max}	=	Faktor intensitas tegangan maksimum
K_I	=	Faktor intensitas tegangan mode I
m	=	Konstanta eksponen persamaan Paris-Erdogan
N	=	Jumlah siklus beban
P	=	Beban
P_m	=	Beban rata – rata
P_{min}	=	Beban minimum
P_{max}	=	Beban maksimum
R	=	Rasio beban
r	=	Jarak dari ujung retak
σ	=	Tegangan

σ_{app}	=	Tegangan aplikasi
σ_c	=	Tegangan kritis
σ_f	=	Tegangan fracture
u, v	=	displasemen
\dot{u}, \dot{v}	=	kecepatan displasemen
U	=	Strain energy per unit tebal
V	=	Kecepatan
γ_p	=	Energi untuk kerja plastis pada retak tidak stabil
W	=	Energi yang diperlukan untuk terjadinya retak
ν	=	Harga poisson
ω	=	Frekuensi sudut eksitasi
ω_n	=	Frekuensi sudut natural
ω/ω_n	=	Tuning factor
τ	=	Tegangan geser
θ	=	Sudut

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Langkah kerja pengujian

Lampiran B Output softwear MSC/NASTRAN

Lampiran C Formulasi elemen

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Tinjauan Umum

Permasalahan keretakan dikapal adalah hal yang sering dijumpai, terutama pada saat reparasi. Tetapi apabila keretakan itu terjadi pada bagian struktur yang masih baru, hal ini perlu untuk mendapatkan suatu perhatian serius. Biasanya yang menjadi pertimbangan adalah masalah desain struktur yang kurang sesuai dengan kondisi operasional atau sebaliknya.

Umumnya struktur didesain untuk mampu menahan suatu tingkat beban yang cukup tinggi untuk dapat menimbulkan/memulai retak, terutama bila diketahui bahwa cacat atau konsentrasi tegangan telah timbul didalam struktur tersebut. Konsekuensi dari adanya cacat bawaan tersebut adalah kenyataan bahwa struktur mempunyai tingkat resiko tertentu untuk mengalami kegagalan. Dengan demikian struktur hanya akan mempunyai jangka waktu pengoperasian yang terbatas. Dalam jangka waktu tersebut probabilitas untuk terjadinya kegagalan harus tetap berada pada tingkat yang cukup rendah yang masih dapat diterima. Suatu hal yang harus diperhatikan adalah bahwa dalam keadaan mengandung cacat, harus dapat diperkirakan berapa lama waktu yang diperlukan untuk menimbulkan retak awal dan seberapa cepat retak tersebut akan menjalar sehingga kekuatan struktur secara keseluruhan akan berkurang.

Hingga saat ini mekanisme patah lelah yang diterima secara luas adalah terdiri dari tiga tahap, yaitu :

- Tahap awal terjadinya retakan (crack initiation)
- Tahap penjararan retakan (crack propagation)
- Tahap patah statis

Pada struktur kapal yang hampir keseluruhan bagiannya menggunakan sistem pengelasan dalam penyambungan antar bagian struktur maka secara umum umur kelelahan strukturnya sangat ditentukan oleh tahap terjadinya penjararan. Hal ini dikarenakan pada sistem sambungan pengelasan retak awal dianggap telah terjadi sehingga perhitungan umur kelelahan yang berperan adalah tahap penjararan retak. Salah satu faktor yang mempengaruhi penjararan retak pada suatu rekayasa struktur adalah adanya pengaruh pembebanan yang meliputi :

- Jenis beban (uniaksial, lentur, puntir)
- Frekuensi siklus beban
- Pola beban (periodik, random)
- Besar tegangan

Pada mekanika kepecahan bentuk penjararan retak pada struktur biasanya digambarkan dalam bentuk diagram yang menyatakan hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan laju penjararan retak. Bentuk hubungan ini didasarkan pada pendekatan secara matematis oleh Paris-Erdogan yang dikenal sebagai hukum Paris-Erdogan (Paris-Erdogan Law)

$$\frac{da}{dN} = C[\Delta K]^m \quad (1.1)$$

Dimana harga C dan m merupakan suatu konstanta yang dipengaruhi oleh keadaan pembebanan dan kondisi lingkungan. Misalnya pengaruh keadaan pembebanan yang salah satu parameternya adalah frekuensi yang berpengaruh pada amplitudo respon apabila ditinjau dari permasalahan getaran. Dalam perhitungan umur penjalaran retak harga C dan m merupakan variabel yang penting selain harga faktor intensitas tegangan.

1.2. Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan ini adalah memberikan verifikasi secara akademis mengenai masalah pengaruh frekuensi pembebanan terhadap performa kelelahan pada suatu struktur dengan memperhatikan kecepatan rambat retak (da/dN) yang terjadi pada struktur tersebut. Tinjauan dilakukan dengan menganalisa data-data dari pengujian penjalaran retak dengan amplitudo beban yang konstan dan frekuensi pembebanan yang berubah. Data-data yang akan diolah dan dianalisa dengan berdasarkan teori kelelahan dan kepecahan akibat adanya getaran. Analisa data disusun menjadi diagram skematik yang bisa menunjukkan korelasi antara frekuensi pembebanan dengan kecepatan rambat retak (da/dN).

Hasil analisa tersebut diharapkan dapat memberikan masukan secara kualitatif dalam permasalahan peningkatan umur desain suatu struktur baja

dalam hubungannya dengan masalah menghindari respon getaran yang berlebihan pada saat kapal beroperasi.

1.3. Batasan Masalah

Dalam analisa mengenai pengaruh frekuensi pembebanan terhadap crack propagation pada struktur, terdapat beberapa batasan yang diberlakukan, antara lain batasan tersebut adalah :

1. Material dasar adalah jenis material yang sering dipakai di perkapalan yaitu material baja lunak (mild steel) jenis SS-41 dengan kegetasan yang cukup sehingga akan mempermudah pengamatan sesuai dengan tujuan analisa.
2. Pemodelan kepecahan adalah mode I dimana arah retak tegak lurus dengan arah pembebanan dan tidak terjadi percabangan ujung retak.
3. Spesimen secara umum berada dalam kondisi plane strain sehingga pengaruh daerah plastis yang terjadi pada ujung retak lebih kecil dari total meterial spesimen.
4. Standart uji yang dipakai dalam pengujian adalah ASTM E 8M untuk uji tarik dan standart uji ASTM E 647-86 untuk pengujian penjalaran retak lelah diatas 10^{-4} m/cycle dengan tipe spesimen Compact Tension (CT).
5. Beban yang digunakan adalah beban dinamis dengan amplitudo beban konstan yang berbentuk sinusoidal dan frekuensi beban yang dipakai adalah 1Hz, 1.6Hz dan 2.2Hz.

1.4. Metodologi Pembahasan

Untuk mendapatkan hasil analisa yang dapat menjadi landasan dalam pengambilan kesimpulan maka disusun metodologi sebagai berikut :

1. Studi literatur mengenai metoda elemen hingga, getaran, kepecahan, kelelahan, dan laju penjalaran retak yang diakibatkan oleh getaran.
2. Studi mengenai pengujian material terdiri dari uji tarik (statis) untuk penentuan mechanical properties dan uji kelelahan (dinamis) untuk mengetahui laju penjalaran retak
3. Penentuan material yaitu baja karbon (high tensile dengan grade bohler dan penentuan standart uji yang digunakan dalam tes spesimen adalah standart American Society for Testing and Material (ASTM).
4. Pelaksanaan pengujian untuk Tension Test
 - Pembuatan spesimen sesuai standart ASTM untuk tension test (E8 M) dengan spesimen sheet type dan untuk fatigue test (E647-86) dengan spesimen middle tension test
 - Pengujian tension test untuk mengetahui yield strength dan tensile strength dari material untuk kondisi standart yang digunakan untuk penentuan kondisi uji kelelahan dari meterial.
5. Pemodelan struktur dengan bantuan program NASTRAN
 - Idealisasi model geometris dari struktur
 - Pemilihan dan pembagian elemen
 - Penentuan tegangan struktur

6. Pelaksanaan pengujian untuk laju penjalaran retak (crack growt rates test)

- Pembebanan menggunakan amplitudo konstan dan beban yang disesuaikan sebagai persentase dari harga yield strength yang diperoleh dari Tension Test dan dengan pertimbangan besarnya frekuensi yang mempunyai daerah beban maksimum dan rentang beban yang berbeda untuk frekuensi yang berbeda.
- Dalam pelaksanaan pengujian ini untuk setiap spesimen akan dilakukan dengan tiga macam frekuensi yang berbeda. Pada saat pelaksanaannya diusahakan agar besarnya beban maksimum dan minimum untuk setiap frekuensi adalah tetap, hal ini dimaksudkan agar amplitudo beban yang didapatkan adalah konstan.

7. Analisa hasil pengujian

Data-data hasil pengujian didapatkan ukuran panjang retak untuk setiap selang siklus pembebanan, selanjutnya dilakukan perhitungan :

- Laju penjalaran retak (da/dN)
- Penentuan rentang faktor intensitas tegangan (ΔK)
- Penentuan kekuatan sisa (residual strength)

8. Kesimpulan

BAB II

KELELAHAN MATERIAL

2.1. Tinjauan Umum

Patah yang terjadi pada komponen konstruksi akibat pembebanan yang berulang disebut patah lelah atau fatigue. Pembebanan yang berulang ini disebut pula beban dinamis, beban tersebut dapat berupa tegangan ataupun regangan. Pada dasarnya retak lelah pada suatu struktur terjadi dalam beban dinamis dibawah beban yang disyaratkan. Untuk itu dalam merencanakan suatu struktur diperlukan pertimbangan yang cukup teliti. Dalam mendisain kelelahan struktur ada dua hal yang penting untuk diperhatikan yaitu mempertimbangkan apa bahaya yang ditimbulkan oleh kerusakan fatik dan mengetahui faktor-faktor yang bisa menambah dan mengurangi bahayanya.

Hingga saat ini mekanisme patah lelah yang diterima secara luas adalah terdiri dari tiga tahap yaitu tahap awal terjadinya retakan (crack initiation) dan tahap penjararan retakan (crack propagation). Setelah retak lelah menjalar cukup jauh maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan segera patah, tahap akhir ini disebut bagian patah statis.

Dalam kenyataannya kegagalan struktur dapat disebabkan oleh beberapa hal, baik karena pengaruh lingkungan ataupun dikarenakan saat

pengoperasiannya. Dalam hal ini kegagalan struktur menjadi beberapa bagian selain kegagalan kimiawi yang disebabkan lingkungan yang korosif yaitu :

1. Kegagalan karena elastisitas yang tidak stabil (Buckling).
2. Kegagalan karena deformasi elastis yang besar dan berlebihan (Yamming).
3. Kegagalan karena deformasi elastis yang buruk (Yielding).
4. Kegagalan karena tegangan tarik yang tidak stabil (Necking).
5. Kegagalan karena kerusakan yang cepat (Cracing).

Pada permasalahan ini yang akan kita bicarakan adalah kegagalan karena keretakan (Cracking) dimana sebagian besar timbulnya keretakan dikarenakan kelelahan struktur. Kegagalan yang disebabkan kelelahan umumnya dimulai dengan timbulnya keretakan awal dimana proses penjarannya sangat tergantung pada tegangan operasional pada strutur. Untuk memahami permasalahan ini perlu juga dimengerti definisi kelelahan yang terjadi pada struktur.

2.2. Pengertian Dasar Kelelahan Material

Salah satu penyebab kegagalan mekanis adalah karena kelelahan (fatigue) material. Beberapa literatur dan artikel menyebutkan bahwa sekitar 50% sampai 90% dari seluruh kegagalan mekanis disebabkan oleh kegagalan kelelahan. Terjadinya kegagalan ini dikarenakan menurunnya ketahanan material yang disebabkan pembebanan yang berulang.

Dari ASTM kelelahan didefinisikan sebagai berikut :

Proses progresif dilokalisasi struktur permanen yang merubah kejadian dalam material yang dijadikan subjek terhadap kondisi yang menghasilkan tegangan dan regangan fluktuasi pada beberapa titik atau titik-titik yang dapat memuncak dalam retak atau kepecahan seluruhnya setelah jumlah fluktuasi tertentu.

Dari definisi diatas dapat diambil kata penting yang dapat menjelaskan pengertian kegagalan kelelahan yaitu :

- Kata Progresif yang mempunyai arti bahwa terjadinya proses kelelahan diluar periode waktu dan penggunaan. Kegagalan kelelahan sering terjadi secara tiba-tiba tanpa ada peringatan, meskipun demikian mekanismenya melibatkan pengoperasian sejak awal bagian atau struktur itu digunakan.
- Kata Dilokalisasi mempunyai maksud bahwa berlangsungnya proses kelelahan pada daerah lokal dari suatu bagian atau struktur bukan seluruhnya. Daerah lokal ini dapat mempunyai tegangan dan regangan yang tinggi dikarenakan perpindahan beban eksternal, perubahan geometri, perbedaan temperatur, tegangan sisa, dan ketidaksempurnaan material.
- Kata Retak yang merupakan dasar yang menyebabkan semua kegagalan kelelahan, dimana penjaran pada material yang tersisa yang tidak dapat menahan lama tegangan dan regangan, dan selanjutnya secara tiba-tiba akan terjadi kepecahan. Dan penjaran retak terjadi dikarenakan pembebanan berulang. Oleh karena itu pada beberapa fakta perhitungan umur kelelahan suatu struktur didasarkan pada penjaran retaknya.

- Kata Kepecahan merupakan suatu tahapan akhir dari proses kelelahan yang akan memisahkan struktur menjadi dua bagian atau lebih.

2.3. Perkiraan umur lelah (fatigue life)

Memperkirakan umur lelah suatu komponen adalah suatu hal yang sangat sulit, kesulitan ini disebabkan oleh banyak faktor yang mempengaruhi umur lelah. Faktor-faktor tersebut adalah :

1. Beban :
 - a. Jenis beban (uniaksial, lentur, puntir)
 - b. Frekuensi siklus beban
 - c. Pola beban (periodik, random)
 - d. Besar tegangan
2. Kondisi material
3. Proses pengerjaan
4. Bentuk dan ukuran komponen
5. Temperatur operasi
6. Kondisi lingkungan

Perubahan kecil pada faktor tersebut diatas akan menyebabkan perubahan pada umur lelahnya, oleh karena itu seringkali perlu dilakukan uji lelah pada suatu struktur yang lengkap ataupun pada suatu komponen dengan kondisi beban dan lingkungan yang mirip dengan situasi yang sebenarnya. Meskipun demikian uji lelah terhadap spesimen yang kecil (coupon test) tetap bermanfaat karena datanya dapat digunakan untuk :

- Sumber kriteria patah lelah
- Mengisolasi berbagai variabel material
- Membandingkan karakteristik material
- Membandingkan besarnya pengaruh proses pengerjaan, kehalusan material, proses perlakuan panas, metoda penyambungan, dan lain-lain terhadap fatigue.

Umur lelah biasanya dinyatakan sebagai jumlah siklus tegangan yang dicapai sampai spesimen atau komponen patah. Dengan demikian umur total tersebut mencakup pula tahap awal retakan dan penjararan retakan yang bila telah cukup penjararannya menyebabkan patah menjadi dua, data kelelahan lain yang penting adalah laju penjararan retakan (crack growt rate).

2.4. Proses Kelelahan Material

Kelelahan adalah suatu mekanisme kegagalan yang terjadi sebagai hasil dari besarnya jumlah beban yang diterima. Dalam satu beban struktur atau material tidak akan mengalami kerusakan jika besarnya beban jauh dibawah beban statis ultimate dan terjadinya kegagalan membutuhkan waktu yang lama. Dalam proses kegagalan kelelahan ini dapat dibedakan tahapan-tahapan umur yang akan terjadi selama dalam umur kelelahan material. Tahapan kelelahan material tersebut yaitu :

- Slip berulang (Cycle slip)
- Nukleasi retak (Crack nucleation)

- Pertumbuhan retak mikro (Growth of microcrack)
- Pertumbuhan retak makro (Growth of macrocrack)
- Kegagalan akhir (Final failure)

2.4.1. Slip Berulang

Pada siklus beban yang relatif rendah (lebih rendah jika dibandingkan dengan statis yang menyebabkan kegagalan) cycle slip akan terjadi dalam jumlah yang kecil dengan butiran-butiran polikristal material. Butiran-butiran ini merupakan fenomena lokal karena slip terpusat dalam beberapa pita slip (slip band). Terbentuknya slip sendiri karena tegangan geser yang melampaui harga kritis tertentu yang terjadi berulang-ulang. Jika cycle slip ini tidak terjadi maka proses kelelahan sendiri tidak akan pernah ada.

2.4.2. Nukleasi retak

Setelah jumlah tertentu pembebanan berulang retak mikro dapat terjadi dalam pita slip. Penyelidikan mikroskopis telah memperlihatkan bahwa crack nucleation terjadi lebih dahulu dalam umur kelelahan material (fatigue life) yang mungkin bisa beberapa prosen dari umur kelelahan yang terlewati. Dari beberapa penyelidikan yang lain crack nucleation adalah suatu fenomena yang terjadi pada permukaan material. Hal ini didasarkan oleh beberapa aspek penting disamping faktor yang lain yaitu kekasaran permukaan dan konsentrasi tegangan. Ada dua aspek penting yang mendasari yaitu :

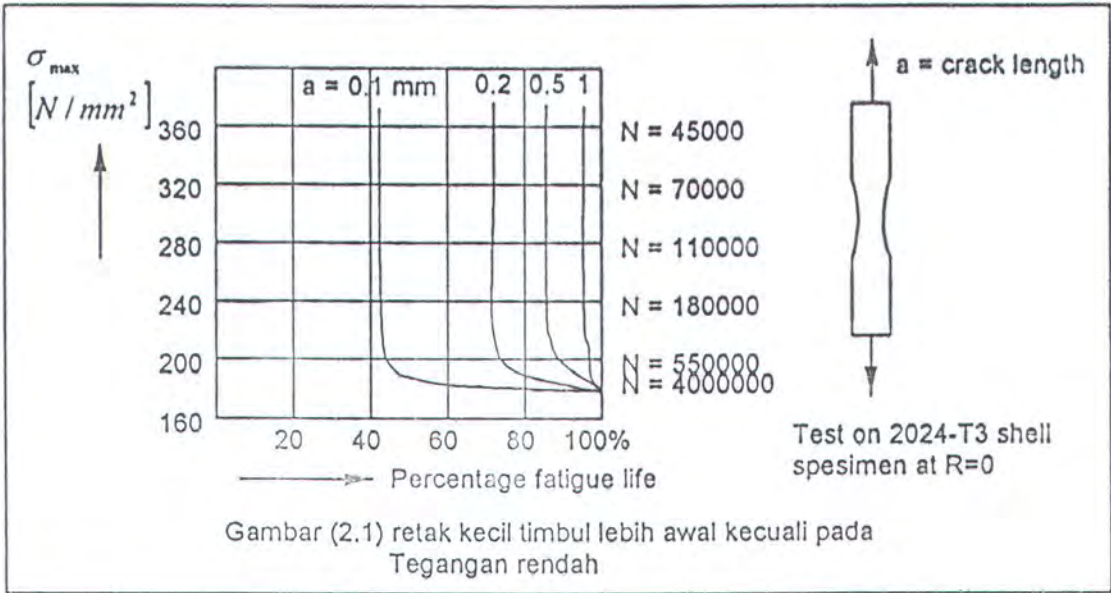
- Butiran-butiran pada permukaan material tidak berdekatan dengan butiran-butiran sekitarnya. Pada salah satu kondisi yang tidak dipengaruhi lingkungan, untuk slip ini menunjukkan tahanan yang rendah pada mikroplastis. Pada permukaan bebas, slip dapat terjadi lebih mudah serta jaraknya lebih besar karena penahanan butiran agar berdekatan tidak ada.
- Butiran-butiran permukaan yang berhubungan dengan lingkungan, untuk udara normal yang mengandung oksigen dan uap air berpengaruh pada cycle slip untuk menghasilkan crack nucleation. Kadang-kadang pengecualian penting dari crack nucleation pada permukaan bebas yang didapatkan, letak nucleationnya pada inclusion.

2.4.3. Pertumbuhan retak mikro

Adanya retak mikro (microcrack) mengakibatkan terjadinya konsentrasi tegangan pada ujung retak. Cycle slip akan terkonsentrasi pada ujung retak, selanjutnya akan terjadi penambahan retak, yang seperti ditunjukkan pada penyelidikan mikroskopis dari pertumbuhan retak, yang dapat mencakup bagian yang terbesar dari umur kelelahan material. Dengan kata lain, masanya relatif lebih lambat dari umur retak untuk dapat dilihat dengan mata, sehingga disebut retak makro (macrocrack) seperti ditunjukkan pada gambar (2.1).

Dalam gambar (2.1) ditunjukkan bahwa setelah retak 1mm yang tampak, walaupun ukurannya kecil sekali jika dibandingkan dengan prosentase umur kelelahan, akan tetapi dapat mengakibatkan kegagalan. Hasil diagram didapat

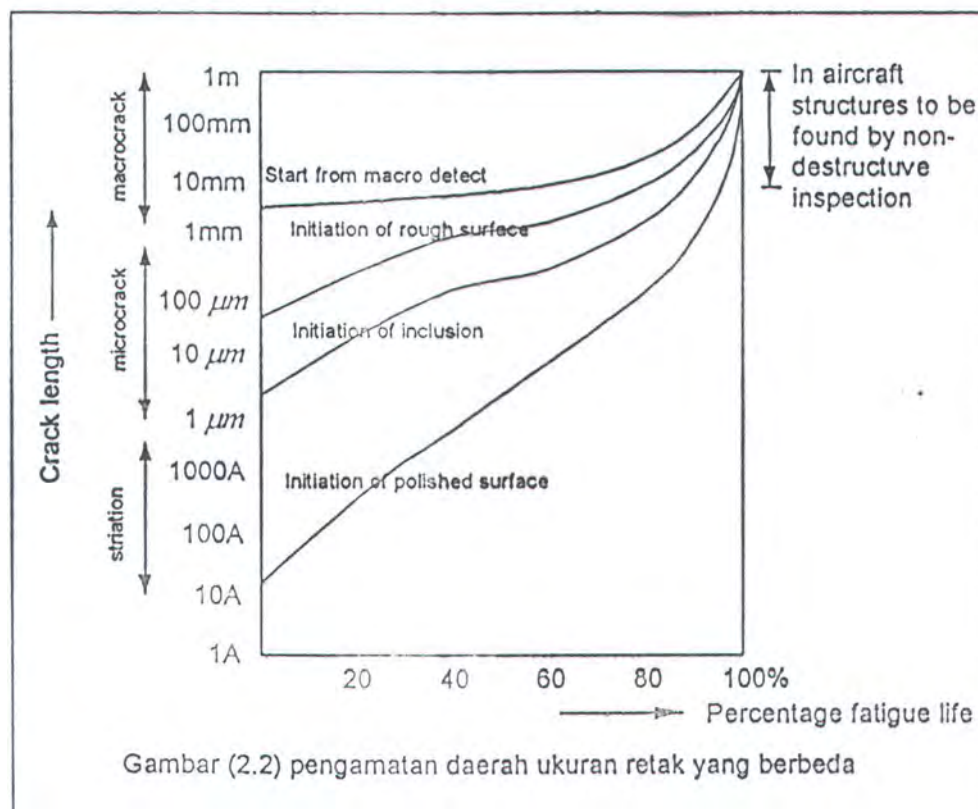
dari spesimen yang tanpa takikan (notch). Untuk spesimen dengan takikan dan kondisi yang lain, retak makro dapat terbentuk lebih cepat. Meskipun demikian hal tersebut masih benar untuk menyatakan sebagian besar dari umur kelelahan yang dibentuk oleh retak mikro pada permukaan material atau didekat permukaannya. Pernyataan ini mempunyai maksud untuk kondisi lokal pada permukaan material dan kualitas material pada permukaan, sangat penting sekali untuk umur kelelahan dan kelelahan dalam daerah retak mikro.



2.4.4. Pertumbuhan Retak Makro

Perpindahan dari pertumbuhan retak mikro menjadi retak makro tidak dapat dengan mudah didefinisikan secara kuantitatif. Definisi secara nominal retak makro adalah suatu retak yang tampak dan dapat dilihat mata. Namun kadang-kadang retak yang kecil itu dapat dilihat mata, sedangkan retak yang besar bisa lepas dari pengamatan selama inspeksi. Hal itu bisa dinyatakan

bahwa ukuran retak paling sedikit mencapai 1cm (atau 0.5 inch) agar bisa diamati perubahannya selama pemeriksaan berkala, dengan mata telanjang, bisa juga dengan bantuan kaca pembesar dan cahaya lampu yang terang.



Gambar (2.2) pengamatan daerah ukuran retak yang berbeda

Sebagai pelengkap apa yang telah diuraikan sebelumnya mengenai umur kelelahan yang ada pada daerah retak mikro, dengan memahami pengertiannya. Pengamatan pertumbuhan retak makro yang harga pertumbuhannya tidak selamanya tergantung pada permukaan lokal dan kondisi material yang menyebabkan terjadinya crack nucleation dan pertumbuhan retak mikro. Perbedaan sebenarnya untuk pertumbuhan retak secara kualitatif diindikasikan pada gambar (2.2). Skala vertikal menunjukan

panjang retak dalam logaritma dan skala yang lain menunjukkan perpindahan dari retak mikro ke retak makro adalah pada daerah 1mm, tetapi harga ini tidak akan menunjukkan yang sesungguhnya.

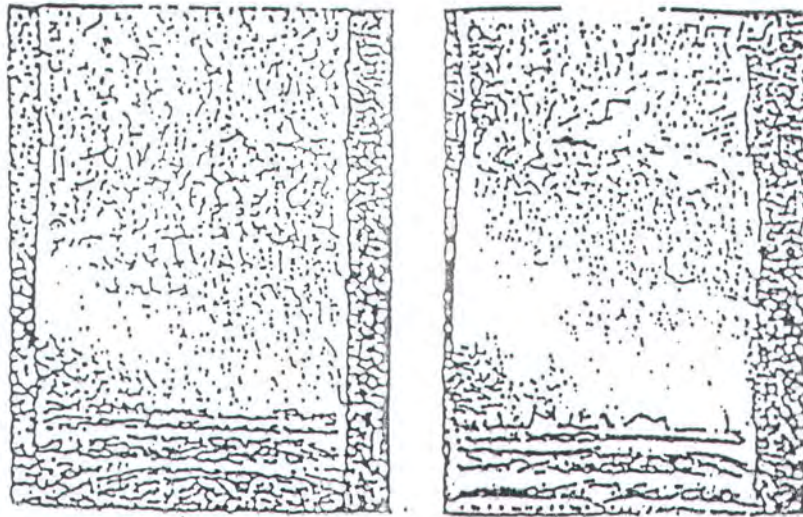
Dalam beberapa kasus, terjadinya kelelahan crack nucleation pada permukaan yang kualitas tinggi, retak akan menyebabkan timbulnya retak makro relatif lebih lambat dari biasanya, apabila awal retak timbulnya hal itu agak lebih dahulu. Dan permulaan retak dari cacat makro adalah retak makro pada permukaan.

2.4.5. Kegagalan Akhir

Saat retak makro menjalar lebih besar dari penampang spesimen yang tidak retak, maka bagian yang tersisa akan menjadi kecil. Dan keadaan ini yang mempunyai beban maksimum yang berulang dan akhirnya kegagalan terjadi pada siklus yang terakhir dari umur kelelahan. Kegagalan umumnya adalah kegagalan stakuquasi yang menunjukkan pentingnya mikro plastis panahan dalam uji statis.

Dalam mekanika kepecahan kegagalan akhir struktur ini dapat dibedakan atas kepecahan cleavage dan kepecahan ductile. Kepecahan cleavage ini terjadi dengan disertai adanya deformasi plastis yang kecil atau kepecahan ini sering disebut sebagai kepecahan brittle. Sedangkan untuk kepecahan ductile kebalikan dari keadaannya. Biasanya pada akhir dari kepecahan cleavage ini pemisahannya terjadi secara ductile. Agar tidak

membingungkan dalam menamakannya hal tersebut didasarkan keadaan mekanisme dasar dari pemisahan material yang akhir dalam keadaan cleavage atau ductile.



Gambar (2.3) Sebelah kiri menunjukkan kepecahan cleavage dan sebelah Kanan menunjukkan kepecahan ductile

2.4.5.1. Kepecahan Cleavage

Kepecahan cleavage biasanya disebut kepecahan brittle yang terjadi pada kristal material. Pada logam kepecahan ini terjadi pemisahan secara langsung sepanjang bidang kristal, sehingga terjadi pemisahan ikatan atom yang sederhana. Misalnya pada besi (Fe) kepecahan cleavage terjadi sepanjang bidang kubik dari masing-masing unit sel. Hal ini akan menyebabkan suatu keadaan dimana retak cleavage pada satu butiran menjadi relatif tidak rata, seperti yang ditunjukkan dalam gambar (2.4).

Butiran-butiran itu saling berdekatan sehingga mempunyai sedikit perbedaan orientasi, sehingga arah retak dalam satu butiran berubah arah dan penjarannya berlangsung pada bidang cleavage tertentu.

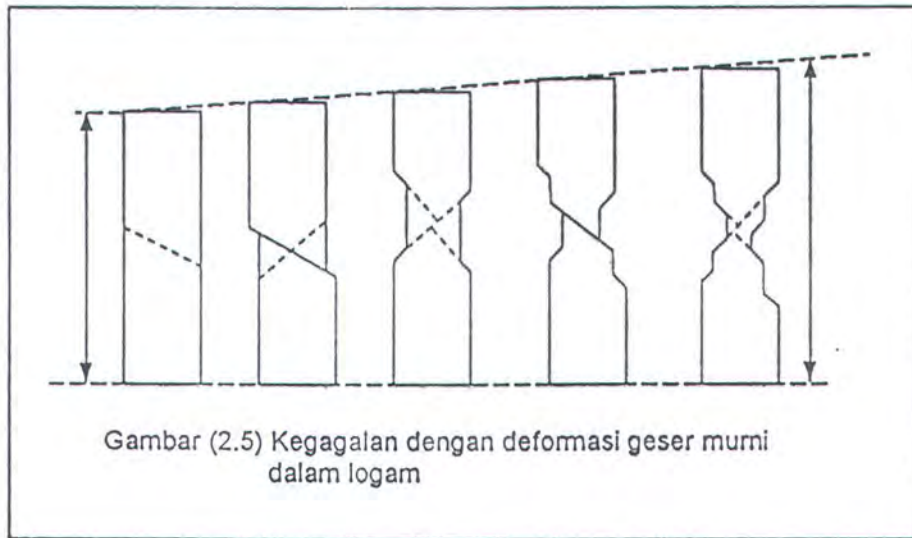


Disamping itu butiran yang terjadi pada permukaan cleavage ini mempunyai bentuk datar dan memiliki reflektivitas yang tinggi sehingga terlihat mengkilap. Kepecahan ini terjadi dalam keadaan plane strain diman deformasi plastis yang terjadi akan dikurangi.

2.4.5.2. Kepecahan Ductile

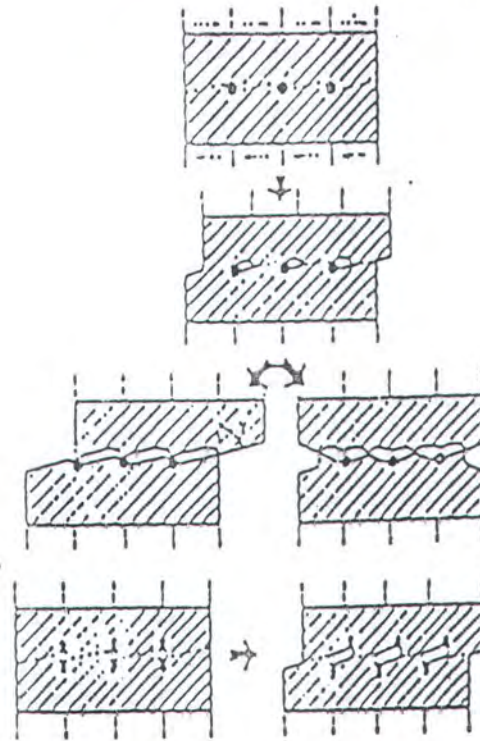
Kepecahan terjadi dibawah pemakaian tunggal dari beban bertambah secara menerus sehingga menyebabkan kepecahan bisa secara brittle cleavage atau kepecahan dengan deformasi plastis yang biasanya disebut ductile. Selanjutnya deformasi plastis ini diperlukan untuk menyebabkan kepecahan yang mungkin terbatas dalam jumlah tertentu, atau energi yang dibutuhkan relatif kecil. Oleh karena itu kepecahan masih brittle dalam arti

engineering dan bisa dimulai dari takikan yang tajam atau retak pada tegangan nominal yang agak rendah, khususnya pada keadaan plane strain yang akan mengurangi kemungkinan deformasi plastis.



Pada beberapa macam tipe kepecahan ductile dengan beban takikan yang berlebihan menghasilkan classic cup and cone fracture. Setelah beban maksimum tercapai, elongasi plastis (plastic elongations) tarikan prismatik (prismatic tensile) yang menyebabkan tidak homogen dan terkonsentrasinya dalam bentuk yang kecil pada spesimen sehingga terjadi necking. Pada keadaan yang ekstrem logam murni, yang sebenarnya bebas dari fase kedua, yang memungkinkan deformasi plastis pada konyugasi bidang slip yang menerus sehingga spesimen mengecil pada satu arah titik sampai terjadi pengurangan luas 100%, dengan demikian kegagalan ini adalah konsekuensi dari deformasi slip, seperti ditunjukkan gambar (2.5).

Jika dibandingkan dengan cleavage, dimana aksi dari tegangan tarik untuk memisahkan, kepecahan ductile tidak dapat terjadi tanpa adanya deformasi plastis. Mekanisme pemisahan akhir adalah konsekuensi langsung dari pergerakan dislokasi dan displasemen slip yang dipakai untuk penjararan dan penggabungan kekosongan (voids).



Gambar (2.6) Penggabungan kekosongan (voids) oleh slip

Selain dari tegangan yang menyebabkan pergerakan dislokasi, regangan plastis tertentu diperlukan untuk terjadinya pemisahan secara ductile. Deformasi plastis ini bisa dibatasi untuk jumlah yang kecil dari seluruh material yang mengalami kepecahan. Karena itu kegagalan ini terjadi dengan deformasi

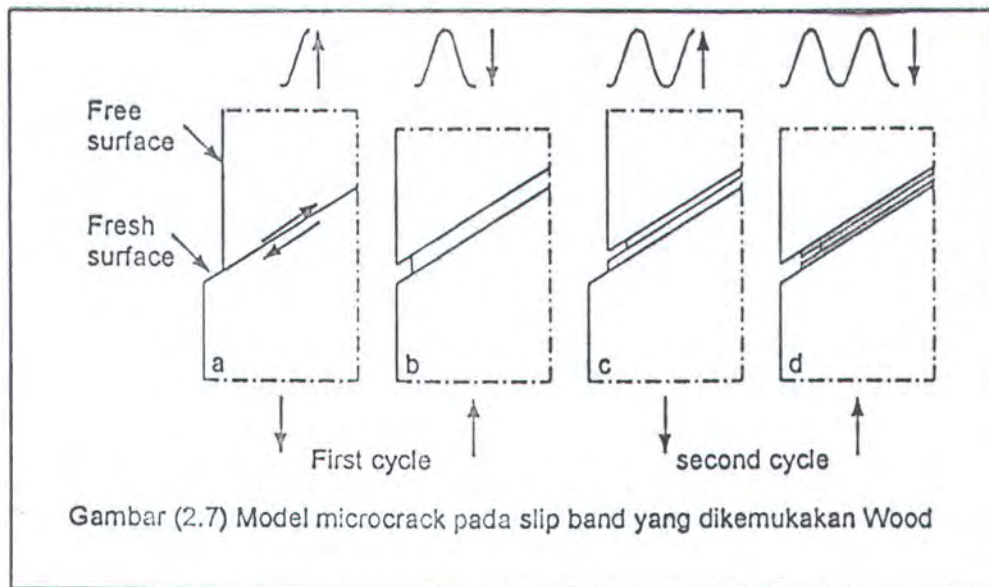
plastis yang relatif kecil dalam skala makro yang hanya memerlukan energi yang kecil.

2.5. Mekanisme Kelelahan Material

Dalam memahami mekanisme kelelahan material ada beberapa macam bentuk model yang digunakan untuk menjelaskan mekanisme tersebut. Tetapi tidak seluruhnya model bisa dipertanggungjawabkan dengan dasar teori yang mendukungnya. Secara umum mekanisme kelelahan material dapat dibagi dalam dua kelompok besar yaitu permulaan retak mikro (Microcrack initiation) dan pertumbuhan retak dan striation (Crack growth and striation)

2.5.1. Permulaan Retak Mikro

Dalam mempelajari terjadinya permulaan retak mikro (microcrack initiation) Wood pada tahun 1958 modelnya secara sederhana, tetapi bisa menjelaskan mekanisme terjadinya. Pada gambar (2.7.a) dijelaskan bahwa pada saat pembebanan ke atas yang pertama kali, slip akan menghasilkan selangkah pergeseran permukaan (surface steps). Dan selanjutnya untuk arah pembebanan ke bawah maka akan terjadi slip yang arahnya akan berlawanan tetapi tidak dalam satu bidang slip yang sama pada bidang slip yang berdekatan.



Tegangan geser pada bidang ini menjadi lebih tinggi hal ini dikarenakan :

1. Pada tingkat mikro terjadi konsentrasi tegangan geser dalam butiran-butiran yang paralel terhadap bidang slip yang telah ditunjukkan selama pembebanan ke atas yang pertama.
2. Mikro plastisitas (plastiscity micro) dari pembebanan ke atas akan meninggalkan tegangan sisa mikro (micro residual stress) dimana hal ini membantu menimbulkan plastisitas yang terbalik (reversed plastiscity) yang disebut efek Bauschinger (ketergantungan tegangan luluh dari jalannya serta arah pembebanan) lokal pada tingkat mikro.

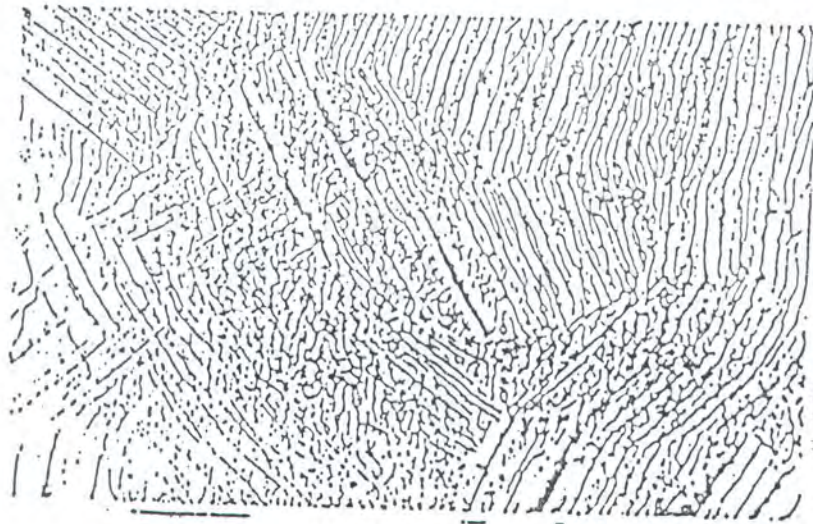
Dalam hal ini perlu dijelaskan mengapa slip terbalik tidak muncul dalam bidang slip yang sama. Akan tetapi jika hal itu terjadi maka keadaannya akan dapat diperbaiki tanpa ada kerusakan (dan kelelahan akan tidak diketahui). Ada dua hal yang dapat menjelaskannya yaitu :

1. Plastisitas yang terbalik secara penuh (fully reversed plasticity) dimana hal ini berarti bahwa pergerakan dislokasi dibalik (reversible dislocation movements). Pada sudut pandang pengerasan regangan (strain hardening). Pinning of dislocations, climb of dislocations adalah kejadian yang sangat berbeda. Penekanannya hanya pada suatu bidang yang telah mengalami slip dalam arah yang berbeda karena pengerasan regangan.
2. Alasan kedua adalah memperhatikan lingkungan slip pada daerah AB gambar (2.7.a) menunjukkan bahwa material yang masih baru berhubungan dengan lingkungan. Dan diketahui semua material teknis beroksidasi secara cepat dan lapisan-lapisan oksida itu akan menempel kuat pada base metal. Dan plastisitas terbalik menginginkan lapisan oksida dihilangkan, tetapi hal tersebut tidak terjadi dengan adanya slip terbalik.

Dalam ruang hampa alasan kedua ini tidak dapat digunakan, sementara itu kelelahan dalam ruang hampa masih mungkin terjadi. Hal ini terbukti pada alasan yang pertama telah dapat menunjukkan irreversibilitas (ketidak mampu balik). Gambar (2.7.c dan d) menunjukkan pengulangan dari apa yang terjadi dalam siklus pembebanan yang pertama. Retak mikro terbentuk sebagai intrusi ke dalam material. Model ini sedikit menjelaskan tentang :

- Crack nucleations yang didapat langsung dari siklus pembebanan yang pertama.
- Pertambahan retak yang dapat terjadi dalam setiap siklus pembebanan yang selanjutnya.

- Bagian yang awal dari pertumbuhan retak mikro akan diharapkan terjadi sepanjang pita slip (slip bands).



Gambar (2.8) Nucleation microcrack pada slip band

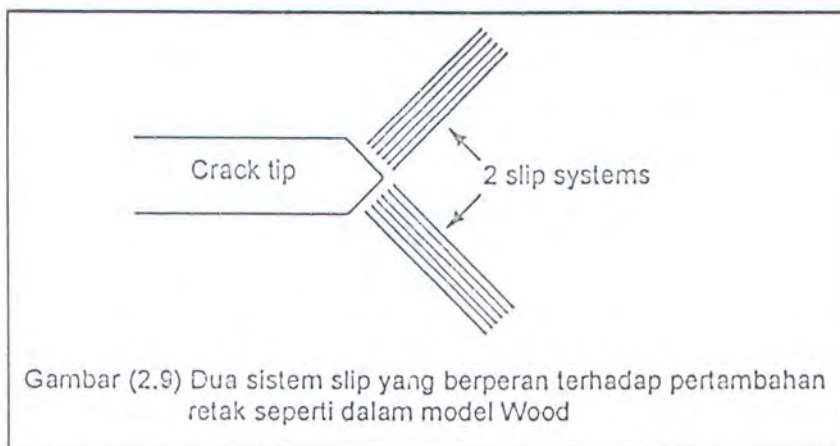
Studi mikroskopis telah menjelaskan bahwa dalam gambar (2.8) ini aluminium murni dalam pengamatan mikroskopis optik. Setelah 5000 siklus hanya tiga pita slip yang terlihat dan hal ini tidak mungkin untuk mengatakan apakah retak ada dalam pita-pita ini. Selanjutnya material itu dibebani sehingga plastisitas makro terjadi. Dengan membukanya pita slip dan akan timbul retak mikro, penambahan pita slip secara statis berakhir dengan retak yang membentuk langkah slip kecil.

Hal itu dapat dijadikan alasan bahwa slip terbalik pada gambar (2.7.b) pada bidang yang berdekatan tepat dibawah satu orientasinya telah mendahului ekstrusi sebagai ganti intrusi. Ekstrusi-ekstrusi ini telah diselidiki

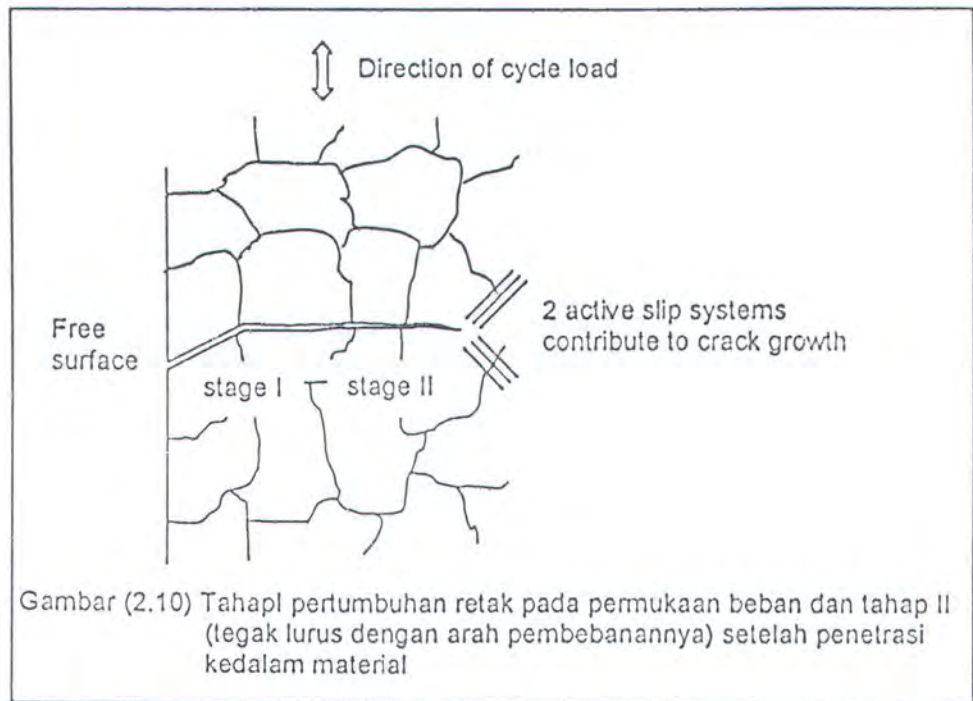
pada aluminium murni, meskipun demikian intrusi-intrusi tersebut membuat retak mikro yang akan menjalar karena membesarnya konsentrasi slip.

2.5.2. Pertumbuhan Retak dan Striation

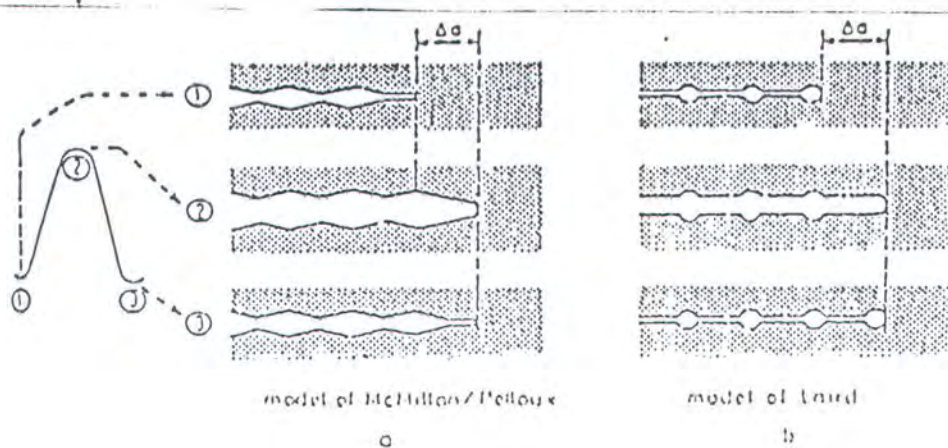
Dalam daerah permulaan dari pertumbuhan retak mikro hambatan yang lebih rendah pada slip ada sebagai akibat berdekatan dengan permukaan bebas akan mendukung keretakan pita slip untuk beberapa waktu. Selanjutnya penetrasi didalam material merupakan hambatan yang lebih rendah, dan akan menghilang. Demikian juga intensitas tegangan pada ujung retak akan naik sebagai akibat dari slip yang ada lebih dari satu bidang slip orientasi.



Retak selanjutnya akan tumbuh pada arah diantara orientasi dua peranan sistem slip. Hal ini biasanya disebut sebagai daerah II atau tahap penjalaran retak yang akan dijelaskan dalam bab III.



Dari gambar (2.10) bisa diperhatikan pita-pita slip pada bagian depan retak yang menerus (continuous crack front) adalah suatu garis yang melewati sejumlah butiran-butiran yang berdekatan. Kontinuitas ini tidak bebas dalam menentukan arah perambatan retak pada butiran yang berdekatan sepanjang bagian depan retak. Jika retak menjadi lebih besar maka intensitas tegangan akan naik dan pertambahan retak setiap siklus akan bertambah lebih besar. Plastisitas mikro dalam setiap siklus akan naik dan jika harga pertumbuhannya cukup besar plastisitas mikro dapat diamati pada permukaan kepecahan dengan menggunakan mikroskop elektron. Dua model yang berbeda dari bentuk perambatan retak yang ditunjukkan oleh Laird Smith dan model yang ditunjukkan Mc. Millan/ Pelloux.



Gambar (2.11) dua model plastisitas mikro dan striation

a. Model McMillan

b. Model Laird dan Smith

Selama beban naik retak akan diperpanjang dan pada saat yang sama itu akan terjadi penumpukan ujung retak (crack tip blunting). Selama tanpa ada pembebanan yang selanjutnya ujung retak akan dipertajam kembali pada satu model yang kurang lebih simetri satu sama lain. Kedua model ini pada tingkat mikro meninggalkan macam-macam barisan deformasi plastis pada permukaan kepecahan. Barisan-barisan ini pada umumnya disebut sebagai striation. Satu striation berhubungan dengan satu siklus beban. Bukti yang nyata dapat dilihat dalam gambar (2.12) dimana urutan pembebanan periodik berhubungan dengan tepat dengan urutan striation. Striation ini sangat sulit dideteksi dengan mikroskop optik dan hanya bisa diamati dengan jelas menggunakan mikroskop elektron.

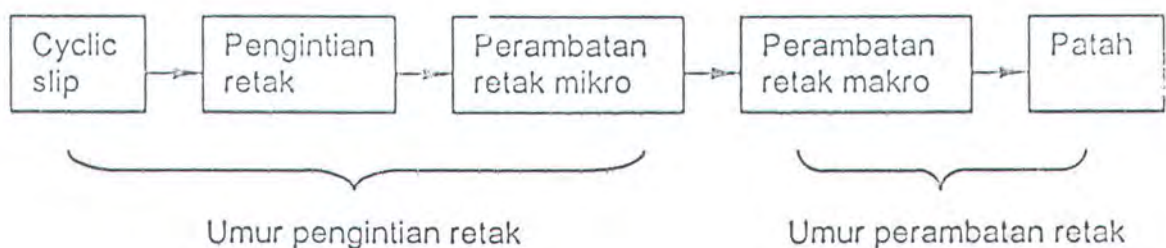
BAB III

PENJALARAN RETAK

3.1. Tinjauan Umum

Bagian yang terpenting dari proses kegagalan material karena kelelahan adalah pada tahap penjalaran retak, dimana pada bagian ini yang menentukan umur pemakaiannya yang digunakan untuk perencanaan.

Kegagalan dengan modus kelelahan dapat terjadi pada struktur yang mengalami beban berfluktuasi. Terjadinya kelelahan pada struktur dapat dibagi menjadi beberapa fase.



Pada fase pertama terjadi cyclic slip, setelah mengalami sejumlah siklus beban akan terjadi retak mikro pada slip band, pada fase ini retak mulai menginti, retak mikro ini akan merambat sehingga membentuk retak makro, transisi retak mikro menjadi retak makro sulit ditentukan, sebagai patokan didefinisikan retak makro sebagai retak yang dapat dilihat dengan mata telanjang. Retak makro akan merambat sehingga penampang sisa (ligamen) menjadi semakin kecil yang pada akhirnya penampang tersebut tidak lagi dapat menahan beban berfluktuasi.

Dalam permasalahan penjalaran retak pemakaian mekanika kepecahan dalam kelelahan, dinyatakan dalam hubungan antara harga penjalaran retak dengan faktor intensitas tegangan yang dapat menjadi pertimbangan. Pada tahap penjalaran permasalahan dibatasi oleh evaluasi penggunaan dan kekurangan dari hubungan keduanya. Mekanika penjalaran ini sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter, misalnya parameter pembebanan, parameter bentuk geometri specimen dan kondisi saat pengujian.

Dalam pengembangannya teori kepecahan ini dikelompokkan dalam dua bagian, yaitu :

1. Linear elastic fracture mechanics
2. Elastic plastic fracture mechanics

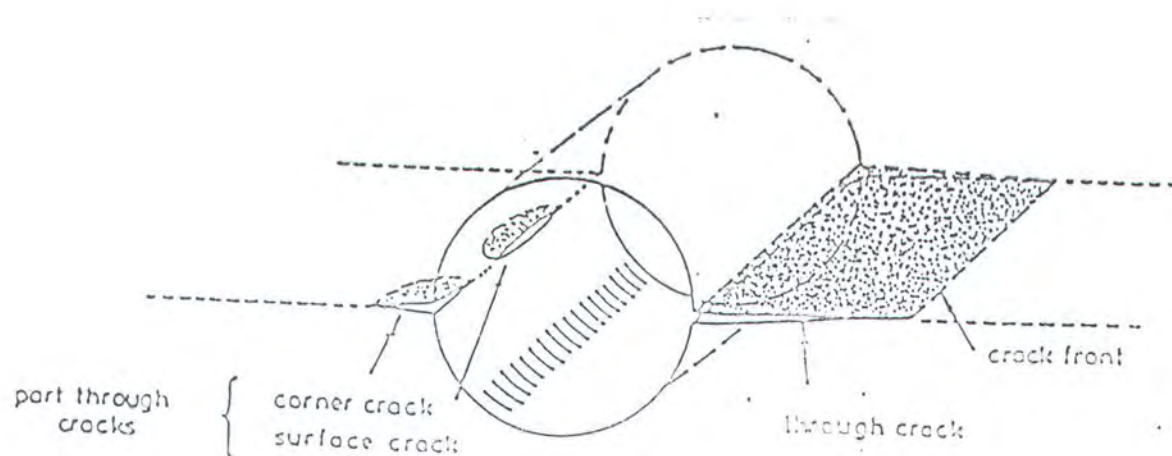
Linear elastic fracture mechanics berdasarkan pada distribusi tegangan elastis disekitar ujung retak disamping itu juga berdasarkan pada keseimbangan energi untuk pertambahan retak. Konsep ini digunakan bila dengan asumsi daerah plastik diujung retak kecil bila dibandingkan dengan panjang retak. Sedangkan bila daerah plastik tersebut besar maka digunakan Elastic plastic fracture mechanics.

3.2. Konsep-Konsep Dasar Fracture Mechanics

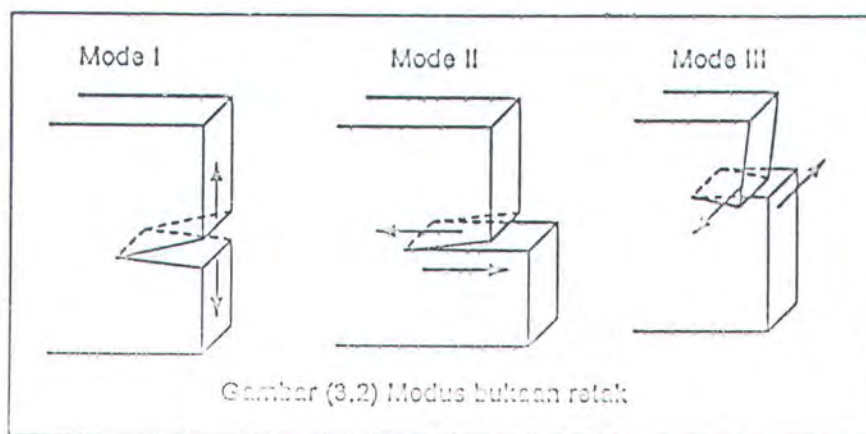
3.2.1. Jenis Retak dan Modus Buka-an Retak.

Dalam literatur dikenal adanya dua jenis retak yaitu *Through Crack* dan *Part Through Crack*. Throught Crack terjadi misalnya pada kulit pesawat yang cukup tipis sehingga retak tersebut menembus ketebalan kulit. Jika retak terjadi

pada bagian-bagian yang cukup tebal pada umumnya retak mengalami fase perambatan dimana retak tersebut belum menembus permukaan yang lainnya, retak jenis ini dikenal dengan nama Part through crack. Dalam analisa part through crack dapat diidealisasikan sebagai retak sudut berbentuk seperempat elips atau retak permukaan berbentuk setengah elips. Part through crack yang telah menembus permukaan lainnya akan merambat sebagai through crack.



Gambar (3.1) Through crack dan Part through crack



Gambar (3.2) Modus bukaan retak

a. Mode I : Opening in Tension.

Retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap arah atau bidang penjalaran retak atau displasemen permukaan retak tegak lurus dengan bidang retak.

b. Mode II : Forward Shear.

Retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan geser yang tegak searah dengan penjalaran retak atau displasemen permukaan retak tegak lurus leading edge retak.

c. Mode III : Transverse Shear.

Retak yang diakibatkan oleh adanya tegangan geser dengan arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak atau displasemen permukaan retak adalah dalam bidang retak dan sejajar leading edge retak.

Dalam beberapa masalah deformasi di ujung retak dapat diperlakukan sebagai bentuk salah satu dari mode diatas atau kombinasi dari displasemen lokal tersebut. Selain itu daerah tegangan pada ujung retak dapat diperlakukan seperti displasemen lokal itu. Dalam permasalahan ini mode displasemen yang akan dipakai adalah bentuk mode opening in tension, hal ini dikarenakan mode tersebut sering dijumpai dalam kejadian di lapangan selain itu mode ini lebih mudah dalam pelaksanaan pengujiannya.

3.2.2. Faktor Intensitas Tegangan.

Untuk mendapatkan tegangan pada ujung retak diasumsikan sebuah bentuk sembarang dengan suatu retak sembarang dan sembarang tegangan yang bekerja, baik berupa tegangan akibat tarikan maupun tegangan akibat bending. Bentuk pembebanan mengikuti mode retak I dimana kedua permukaan retak membuka secara tegak lurus terhadap arah bagian yang berlawanan.

Dengan menggunakan teori elastisitas didapatkan tegangan σ_x, σ_y maupun tegangan geser τ_{xy} . Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa keadaan tegangan pada ujung retak setidaknya adalah biaksial dan apabila terjadi penahanan terhadap kontraksi searah tebal komponen maka kondisi tegangan adalah triaksial. Dari penyelesaian medan tegangan didapatkan bahwa tegangan yang terjadi pada elemen material adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_z &= 0 \\ \tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\tag{3.1}$$

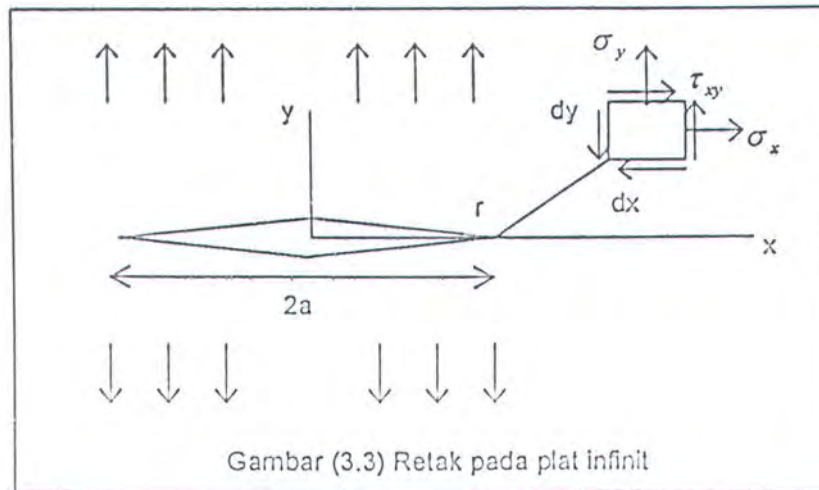
Persamaan ini didasarkan pada teori linear elastis dan merupakan gambaran dari medan tegangan yang terjadi pada daerah sekitar retak. Suku dengan orde tinggi yang terdapat pada lanjutan dari persamaan diatas sering kali dihilangkan

dalam keadaan yang tidak mempengaruhi persamaan secara keseluruhan. Dari persamaan di atas juga dapat diketahui adanya kenaikan tegangan secara cepat pada daerah mendekati ujung retak atau pada daerah dengan nilai r yang kecil. Pada tempat-tempat dengan r mendekati 0 terlihat kecenderungan tegangan untuk mencapai ketakhinggaan (infinity). Hal ini disebabkan oleh tegangan yang berbanding terbalik dengan akar dari r sehingga secara matematis dapat dikatakan terjadi singularitas pada ujung retak dan tidak ada nilai real yang dapat diberikan untuk tegangan yang terjadi di titik tersebut.

Pada kasus dimana $\theta = 0$ yaitu pada daerah sebidang dengan bidang retak, tegangan geser (τ_{xy}) sama dengan nol. Hal ini bersesuaian dengan asumsi bahwa pada daerah tersebut merupakan simetri dari elemen terhadap bidang retak. Pada bidang ini tegangan normal kearah x dan y adalah :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \\ \sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi r}}\end{aligned}\tag{3.2}$$

Dari kedua persamaan di atas tampak bahwa setidaknya pada bidang dimana $y=0$, tegangan transversal σ_x sama besarnya dengan tegangan longitudinal σ_y . Tegangan tersebut ditentukan oleh besarnya jarak titik yang dimaksud dari ujung retak, semakin jauh jaraknya maka tegangan akan semakin rendah. Tegangan juga ditentukan oleh suatu faktor yang masih belum didefinisikan yaitu parameter K .



Parameter K tersebut disebut faktor intensitas tegangan (stress intensity factor) dalam satuan Inggris $psi\sqrt{inch}$ dan memakai indeks (I, II, III) yang menunjukkan mode pembebanannya. Nilai K ini berhubungan dengan tingkat dan jenis tegangan yang bekerja pada komponen (σ), ukuran dan bentuk retak, geometri eksternal dan mode pembebanan pada komponen tersebut.

Perbedaan antara faktor intensitas tegangan dan faktor konsentrasi tegangan dapat dijelaskan dengan pengertian bahwa faktor konsentrasi tegangan merupakan faktor skala untuk tegangan nominal yang merupakan perbandingan antara tegangan lokal maksimum terhadap tegangan nominal. Faktor intensitas tegangan bertindak sebagai faktor skala bagi medan tegangan pada ujung retak. Bila faktor konsentrasi tegangan adalah parameter yang menggambarkan konsentrasi tegangan maka faktor intensitas tegangan mengkarakterisasikan keadaan pada ujung retak (singularitas tegangan), kondisi yang tidak dapat ditangani oleh faktor konsentrasi tegangan.

Untuk mode pembebanan sembarang seperti kasus diatas formulasi K dapat didekati dengan memakai persamaan σ_y tersebut diatas. Diketahui bahwa tegangan pada setiap titik pada material menunjukkan besaran yang proporsional terhadap pembebanan yang dilakukan. Dengan demikian tegangan pada ujung retak juga akan menunjukkan kesebandingan dengan besarnya pembebanan sehingga :

$$\sigma_y \approx \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.3)$$

Selain tergantung pada besarnya beban, tegangan pada ujung retak juga ditentukan oleh ukuran atau panjang dari retak. Tegangan yang lebih tinggi akan terjadi dalam keadaan dimana retak yang terdapat pada komponen lebih besar sehingga ukuran retak harus berada sebagai pembilang pada kesebandingan tersebut. Untuk menghasilkan dimensi yang sama pada kedua sisi maka panjang retak (a) dituliskan dalam tanda akar.

$$\sigma_y \approx \frac{\sigma \sqrt{a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.4)$$

Untuk mendapatkan persamaan dari kesebandingan diatas diperlukan suatu nilai non dimensi. Dengan menggunakan angka non dimensi C didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_y = \frac{C\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.5)$$

Dari hasil perhitungan yang dilakukan didapatkan bahwa nilai $C=\sqrt{\pi}$ untuk kasus dimana retak terjadi pada material plat dengan panjang yang tidak terhingga. Dengan demikian didapatkan persamaan berikut :

$$\sigma_y = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.6)$$

Pembandingan persamaan diatas dengan persamaan σ_y pada penjelasan sebelumnya menghasilkan rumusan untuk faktor intensitas tegangan (K) khususnya pada kasus retak tersebut sebagai berikut :

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.7)$$

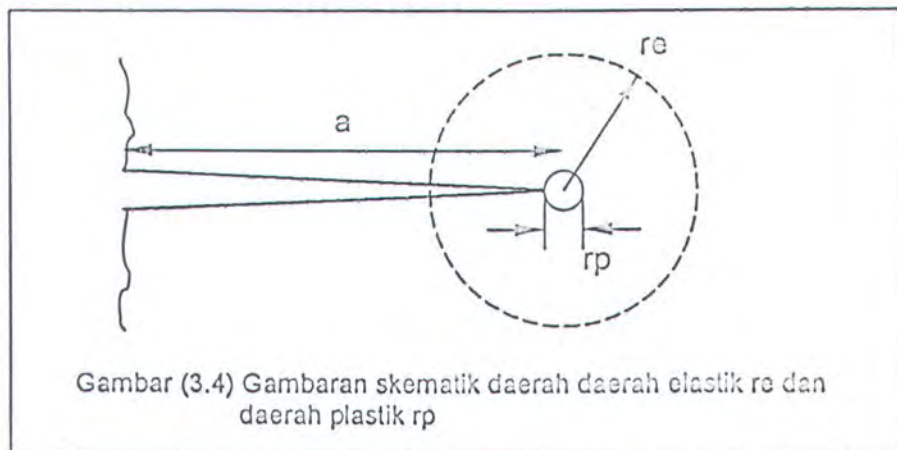
dimana : a = panjang retak

σ = tegangan yang diberikan

3.2.3. Plastisitas pada Ujung Retak

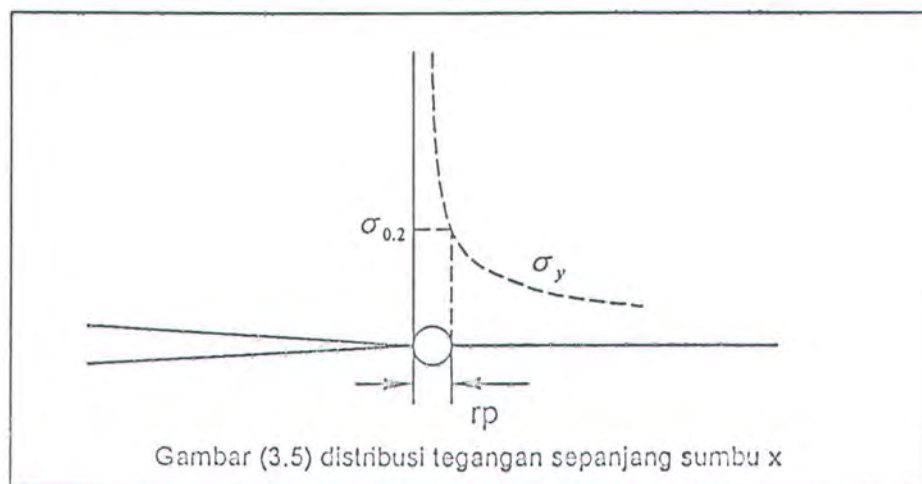
Dari persamaan (3.1) dapat dilihat bahwa besarnya tegangan menjadi tak berhingga untuk $r=0$. Secara fisik hal ini tidak mungkin terjadi, material pada ujung retak akan mengalami deformasi plastik jika tegangan yang bekerja lebih besar dari tegangan luluh. Adanya daerah plastik ini akan mengubah distribusi tegangan di daerah elastik. Meskipun demikian distribusi tegangan tidak akan banyak berubah jika daerah plastik yang terjadi cukup kecil dibandingkan dengan daerah elastik dimana persamaan (3.1) masih berlaku. Pada gambar (3.4) ditunjukkan secara skematis daerah plastik (r_p) dan daerah elastik (r_e) dimana persamaan (3.1) masih berlaku. Pada umumnya jika $r_e \ll a$ dan $r_p \ll$

re maka persamaan 3.1 akan tetap berlaku, kondisi ini disebut *Small Scale Yielding*.



Estimasi besarnya daerah plastik dilakukan dengan memperhatikan gambar (3.5). Distribusi σ_y sepanjang sumbu x dapat diperoleh dari persamaan 3.2. Sebagai estimasi awal harga r_p untuk kondisi tegangan bidang substitusikan $\sigma_{0.2}$ pada persamaan 3.2 sehingga diperoleh :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad (3.8)$$



Pendekatan pada persamaan (3.8) akan lebih kecil dari pada luas daerah plastik yang sebenarnya karena dalam penurunannya tidak dimasukkan pengaruh menjadi rataanya distribusi tegangan didaerah plastik (daerah yang diarsir). Pendistribusian kembali tegangan dari daerah plastik ini menyebabkan r_p menjadi lebih besar dari pada estimasi pada persamaan (3.8). Irwin memasukkan pengaruh pendistribusian tegangan ini pada suatu faktor koreksi yang besarnya adalah r_p sehingga besarnya daerah plastik adalah dua kali estimasi pada persamaan (3.8) dengan demikian :

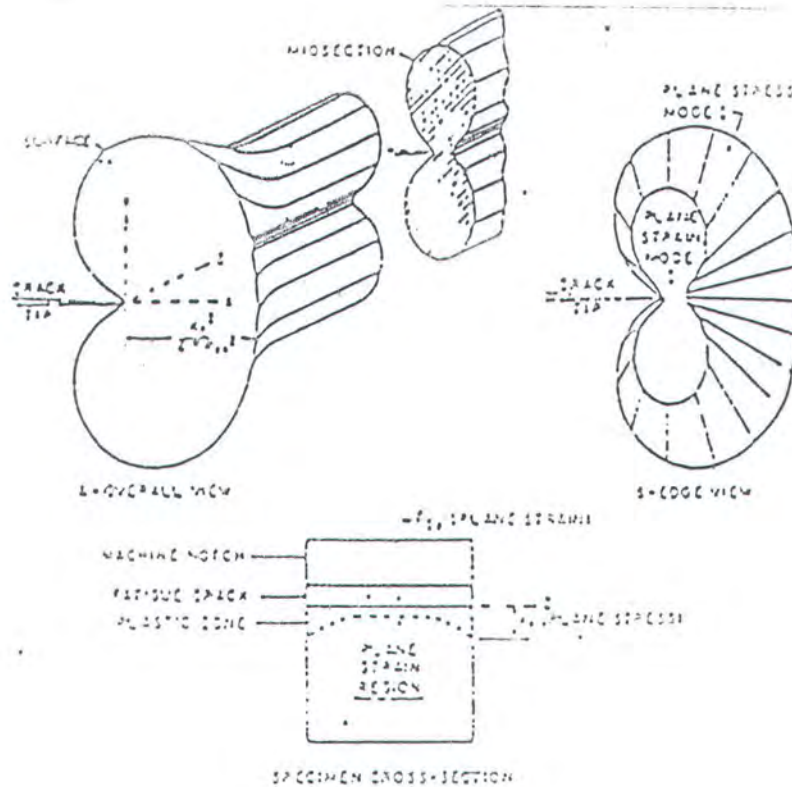
$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad (3.9)$$

Untuk kondisi regangan bidang estimasi daerah plastik dapat dilakukan dengan memasukkan kriteria mulur misalnya kriteria von mises. Karena kontraksi lateral pada kondisi regangan bidang terbatas maka tegangan mulur efektif akan lebih tinggi. Hal ini akan menyebabkan daerah plastik pada kondisi regangan bidang jauh lebih kecil dari pada keadaan tegangan bidang. Umumnya besarnya daerah plastik untuk keadaan ini diestimasi dengan persamaan berikut :

$$r_p = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{0.2}} \right)^2 \quad (3.10)$$

Pada persamaan (3.9) dan (3.10) diasumsikan bahwa daerah plastik berbentuk lingkaran seperti digambarkan pada gambar (3.5). Analisa lebih rinci dan hasil eksperimen menunjukkan bahwa bentuk daerah plastik menyerupai bentuk

kupu-kupu. Meskipun demikian pendekatan dengan persamaan (3.9) dan (3.10) masih cukup baik sebagai estimasi awal.

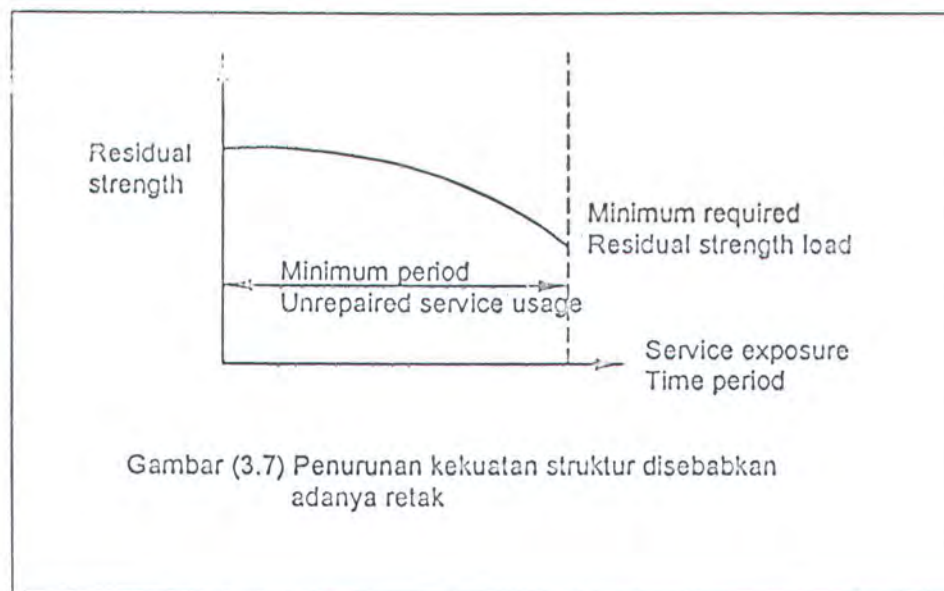


Gambar (3.6) Bentuk daerah plastis sepanjang tebal specimen pada ujung retak

3.2.4. Fracture Toughness

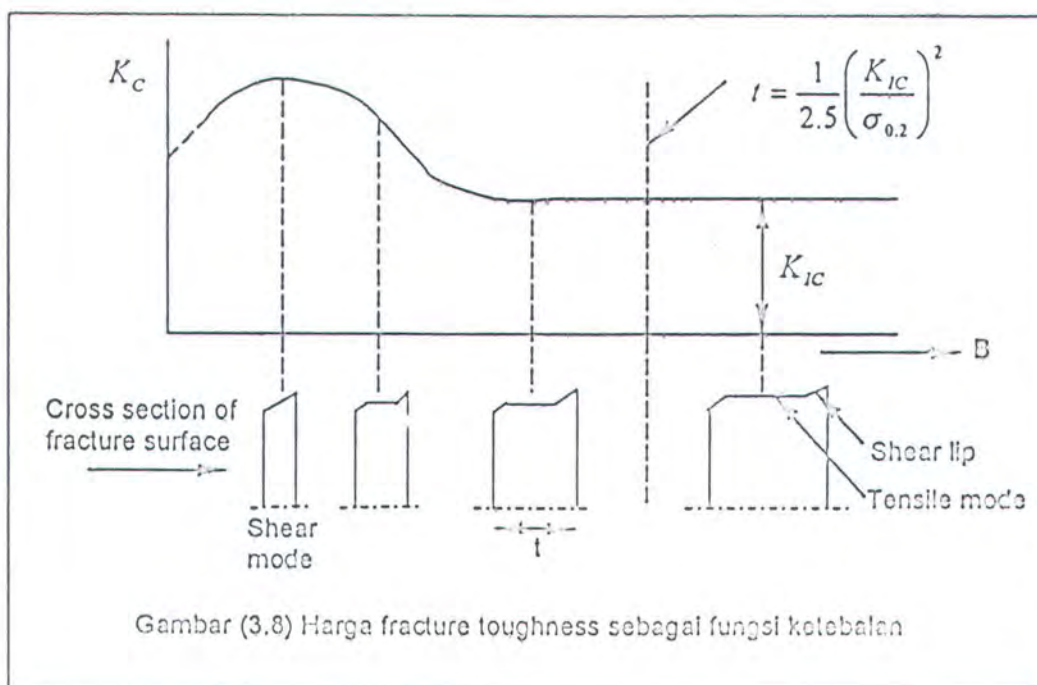
Retak pada struktur akan menyebabkan menurunnya kekuatan statik. Penurunan kekuatan ini secara skematik ditunjukkan pada gambar (3.7). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa makin panjang retak makin rendah kekuatan statik yang dapat diterima. Kurva seperti gambar (3.7) dikenal

sebagai kurva kekuatan sisa (residual strength curve). Sensitivitas material terhadap adanya retak dinyatakan dengan Fracture Toughness. Untuk retak modulus I diberi simbol K_{IC} yang merupakan harga kritis faktor intensitas tegangan K yang menyebabkan kegagalan statik pada retak modulus I. K dan K_{IC} pada struktur yang mengandung retak dapat dianalogikan dengan σ dan $\sigma_{0.2}$ pada struktur tak bercacat.



Perlu diperhatikan bahwa harga fracture toughness juga tergantung pada ketebalan spesimen yang dipakai dalam pengujian, hal ini ditunjukkan pada gambar (3.8) pada gambar tersebut juga diperlihatkan penampang permukaan patahan. Dari gambar (3.8) dapat dilihat bahwa bahwa harga fracture toughness lebih besar untuk spesimen tipis. Selain itu perlu diperhatikan pula bahwa permukaan patahan spesimen tipis membentuk modulus geser (shear mode). Bertambahnya ketebalan akan menyebabkan

mengecilnya modulus geser pada permukaan, bersamaan dengan itu harga fracture toughness juga menurun. Patahan jenis ini menunjukkan permukaan petahan dengan modulus campuran (mixed mode) antara shear mode dan tensile mode. Untuk spesimen yang cukup tebal tensile mode akan menjadi dominan dan harga fracture toughness akan mencapai harga minimum K_{IC} . Karena besarnya tidak tergantung pada ketebalan K_{IC} dapat disebut sebagai konstanta material.



K_{IC} dikenal dengan sebutan *Plane Strain Fracture Toughness* karena untuk spesimen yang cukup tebal kondisi tegangan mendekati kondisi plane strain, pada kondisi ini regangan dalam arah ketebalan akan tertahan sehingga dapat diasumsikan bahwa keadaan regangan adalah plane strain. Untuk

spesimen yang cukup tipis harga fracture toughness disebut *Plane Stress Fracture Toughness*. Untuk kasus ini tegangan dalam arah ketebalan dapat diabaikan sehingga kondisi tegangan dapat diasumsikan sebagai plane stress. Plane Stress Fracture Toughness diberi simbol K_{Ic} .

3.3. Penjalaran Retak Kelelahan

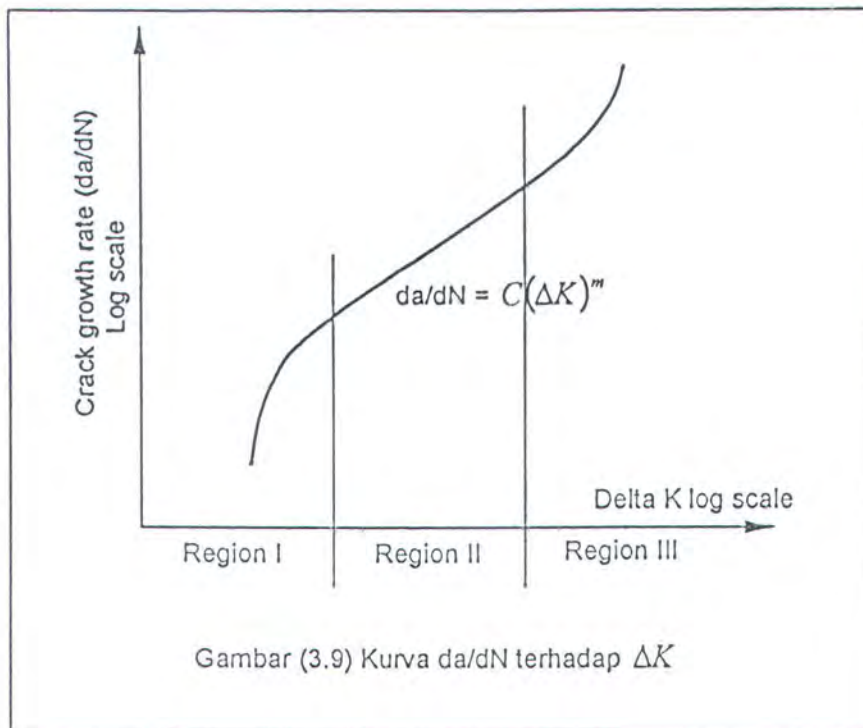
3.3.1. Grafik Penjalaran Retak Kelelahan

Karakteristik penjalaran retak fatigue untuk setiap material dan konfigurasi pengujianya dapat diterangkan dengan menggunakan hubungan antara laju penjalaran retak (da/dN) dan interval intensitas tegangannya. Data yang didapatkan dari sebuah pengujian diplotkan pada suatu grafik log-log. Pada sekitar nilai pertengahan dari ΔK umumnya didapatkan suatu garis lurus pada grafik tersebut. Garis lurus tersebut menurut Paris dapat dituliskan dengan persamaan berikut :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Dimana : C adalah konstanta

m adalah harga kemiringan dari garis



Pada laju penjaralan retak yang sangat rendah kurva yang dibentuk dari data pengujian tersebut akan menjadi sangat curam dan secara asimtotik mendekati garis vertikal. Interval intensitas tegangan pada daerah ini disebut ΔK threshold dan penjaralan retak pada daerah ini akan sulit untuk diamati. Umumnya dianggap bahwa material yang mengalami pembebanan dengan harga K dibawah K threshold tidak akan mengalami penjaralan retak.

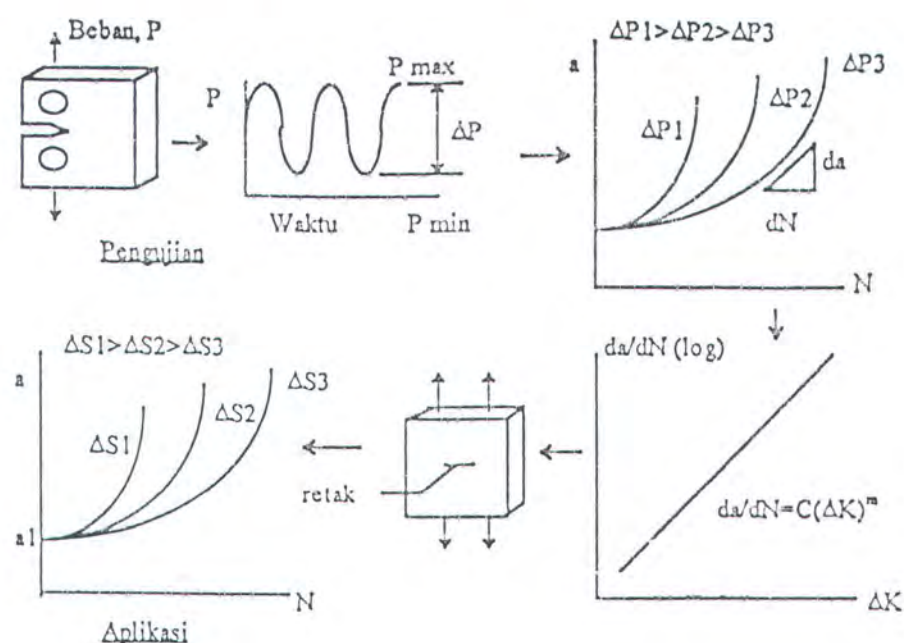
Dibagian atas dari kurva tersebut juga dapat dijumpai bagian yang curam. Hal ini menggambarkan adanya peningkatan laju penjaralan retak hingga mencapai keadaan penjaralan yang tidak stabil pada saat spesimen akan mengalami kegagalan akhir. Keadaan tersebut dapat terjadi dengan keadaan zona plastik yang kecil dimana untuk tiap material dan ketebalan

spesimen kurva tersebut secara asimtotik akan mendekati harga fracture toughness K_{IC} atau K_{IC} . Bila terjadi peluluhan plastik secara menyeluruh sehingga ukuran zona plastik menjadi sangat besar pada saat penjalaran retak tidak stabil terjadi, maka penerapan ΔK pada bagian kurva ini akan tidak berlaku lagi karena adanya pembatasan penerapan konsep faktor intensitas tegangan.

Pengevaluasian karakteristik penjalaran retak pada suatu material dan aplikasi informasi yang didapat dari pengujian secara garis besar adalah sebagai berikut : Pertama-tama pada sebuah spesimen dengan suatu konfigurasi tertentu dilakukan pengujian fatigue dengan beberapa tingkat pembebanan yang berbeda. Dari pengujian tersebut didapatkan grafik yang menggambarkan beberapa laju penjalaran retak pada suatu kisaran tertentu dari tiap-tiap spesimen. Laju penjalaran retak tersebut kemudian dievaluasi dan diplotkan pada kurva da/dN terhadap ΔK . Dari kurva yang telah dibuat tersebut aplikasi pengujian pada kondisi aktual suatu rekayasa struktur dapat dilakukan dengan terlebih dahulu ditentukan ΔK yang berlaku untuk komponen rekayasa yang dimaksud. Dengan berdasar pada kurva $da/dN - \Delta K$ ini maka dapat diperkirakan suatu bentuk kurva yang menghubungkan panjang retak dan jumlah siklus pembebanan komponen tersebut.

Sasaran yang hendak dituju dalam aplikasi ini adalah didapatkannya suatu perkiraan yang memadai tentang umur suatu komponen dan dengan demikian dapat ditentukan faktor keselamatan yang dapat diterapkan dan

interval inspeksi yang harus dilakukan. Relevansi yang berlaku antara pengujian yang dilakukan di laboratorium dan aplikasi struktur di lapangan merupakan suatu syarat yang harus dipenuhi dalam hal ini. Masalah ini merupakan sebuah karakteristik khusus dari pengujian ini dan akan dibahas dalam pembahasan berikutnya.



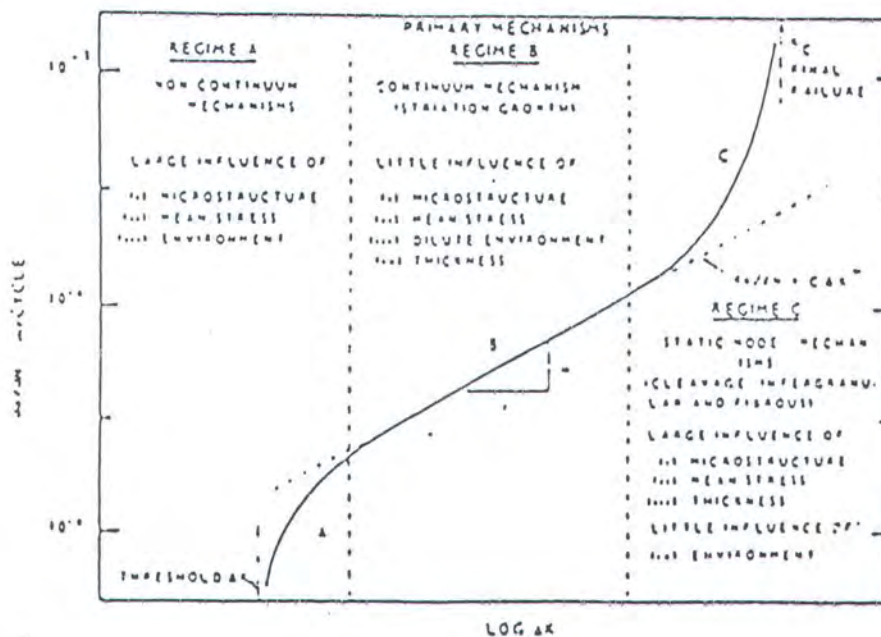
Gambar (3.10) Langkah-langkah penentuan da/dN dan aplikasinya pada struktur

3.3.2. Daerah Pertumbuhan Retak Lelah di Tengah

Besarnya harga pertumbuhan retak untuk daerah pertengahan berkisar antara 10^{-8} sampai 10^{-6} m/cycle (pada tahap II) dari gambar (3.11) untuk kondisi pembebanan tertentu. Persamaan Paris Erdogan memberikan gambaran yang baik untuk harga konstanta eksponen (m) diberikan dalam

rentang $2 < m < 5$. Hasil itu didapat dari data pertumbuhan retak dalam jumlah besar, dengan tujuan untuk mendapatkan pendekatan engineering material untuk mengetahui toleransi cacat dalam menanggulangi permasalahan desain kelelahan.

Untuk harga pertumbuhan retak di daerah tengah (daerah II) penjalaran retak lelah didominasi oleh mekanisme *Striation Ductile Transgranular* dan sedikit sekali permasalahan oleh mikro struktur misalnya tegangan rata-rata dan pengaruh ketebalan. Mekanisme pola striation ini pertama kali diselidiki Zappfe dan Worden pada permukaan kepecahan kelelahan dan beberapa penelitian kemudian memberikan konfirmasi formasi dari striation sebagai dasar mekanisme dari penjalaran retak.



Gambar (3.11) Variasi signoidal laju penjalaran retak, da/dN dengan intensitas tegangan bolak-balik, ΔK

Analisa secara fractografi pada permukaan kepecahan ternyata pola striation yang terbentuk bersesuaian dengan pola pembebanannya. Selama pertumbuhan retak ditengah (daerah II) setiap spasi dari striation berkaitan dengan setiap siklus beban. Berdasarkan perubahan bentuknya, ternyata striation mempunyai lebar yang berbeda-beda yang tergantung pada jumlah sistem slip yang terjadi dan tingkat kekuatan dari material.

Secara umum mekanisme penjalaran retak tersusun dalam formasi striation selama dalam tahap II pada keadaan ini penjalaran melibatkan terjadinya blunting dan resharpening pada ujung retak. Dan model blunting plastik pertama kali dikemukakan oleh Laird dan Smith dan kemudian dimodifikasi oleh Laird yang selanjutnya dijadikan dasar dari bentuk model slipping off atau unzipping yang lain. Laird memperbaiki model formasinya pada daerah permukaan retak yang bertambah selama dalam bagian siklus pembebanan. Dan ujung retak dipertajam selama tanpa beban. Penjalaran retak ini dikendalikan oleh regangan bolak-balik pada ujung retak. Jika jumlah regangan yang proporsional terhadap displasemen bukaan retak (crack tip opening displacement, CTOD) maka besarnya harga penjalaran retak untuk tiap siklusnya dapat diprediksi dengan :

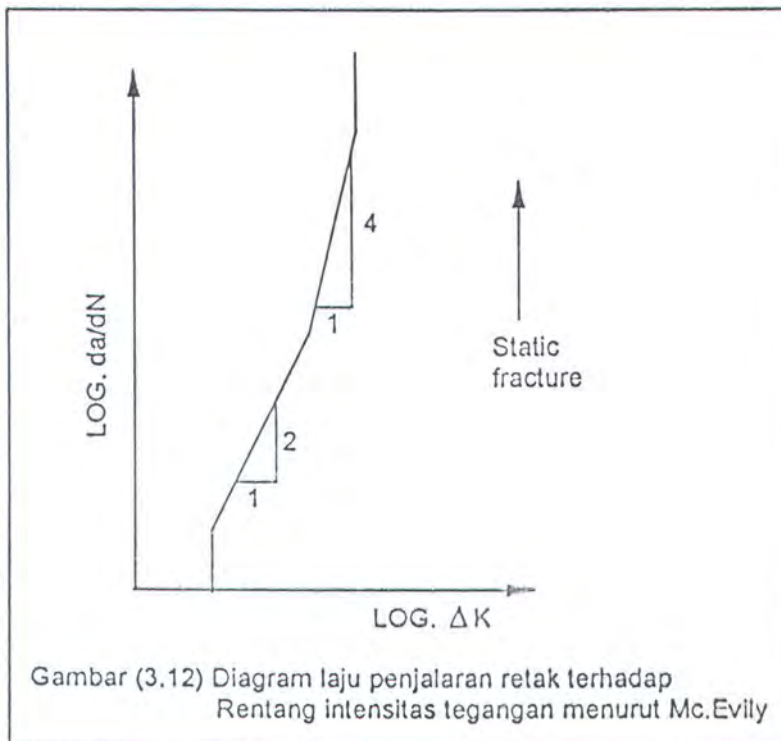
$$\frac{da}{dN} = \beta \cdot \Delta(CTOD) = \beta \frac{\Delta K^2}{E \cdot \sigma_y} \quad (3.12)$$

dimana E adalah modulus young, σ_y siklus tegangan alir (cyclic flow stress)

dan β efisiensi proses blunting, $\Delta(CTOD)$ adalah siklus displasemen bukaan ujung retak.

Model Laird dan Smith dan beberapa macam model blunting plastik yang lain didasarkan pada teori displasemen bukaan retak yang menunjukkan $m=2$ (second power Paris – Erdogan law). Sebaliknya teori penjalaran retak lelah didasarkan pada kerusakan kumulatif pada daerah plastik depan ujung retak yang menunjukkan $m=4$ (fourth power Paris-Erdogan law). Dengan menggunakan model kesetimbangan energi penjalaran retak lelah dapat diperkirakan $m=2$ dan $m=4$ untuk harga eksponen m dari persamaan Paris-Erdogan. Harga $m=2$ dihasilkan dalam kepecahan yang dianggap disebabkan oleh mekanisme mikro pada daerah proses kepecahan di sekitar daerah tegangan ujung retak. Dan besar panjangnya bisa dibandingkan dengan $\Delta(CTOD)$. Model blunting plastik termasuk dalam kategori ini. Harga $m=4$ didapatkan apabila kepecahan disebabkan oleh mekanisme mikro yang terjadi pada harga penjalaran yang rendah pada saat daerah plastik terbalik yang diperkirakan sama dengan proses daerah kepecahan.

Analisa Mc.Evily menunjukkan bahwa hasil yang baik dari penjabaran persamaan Paris-Erdogan yang diartikan linear dengan slope dari harga eksponen m tidak selalu didapatkan. Meskipun demikian harga m dapat diperkirakan sama dengan 2 untuk harga ΔK yang lebih rendah dan harga slope m dapat menjadi lebih tinggi pada harga ΔK yang lebih tinggi.



Dalam dasawarsa belakangan ini pernyataan data-data mengenai penjaran retak dilengkapi dengan studi fractografi dari mekanisme penjarannya. Dan dikemukakan bahwa sebagian besar harga eksponen m adalah sama dengan 2 adalah mungkin karena mekanisme penjaran mode statik sebagian atau seluruhnya mengembalikan penjaran striation.

Pada studi dengan pengamatan secara teliti dengan fractografi Richard dan Lindley mengemukakan bentuk hubungan penjaran retak dan faktor intensitas tegangan dalam persamaan yang didasarkan dari hukum Paris-Erdogan.

$$\frac{da}{dN} = 1 \cdot 10^{-11} \cdot \Delta K \quad (3.13)$$

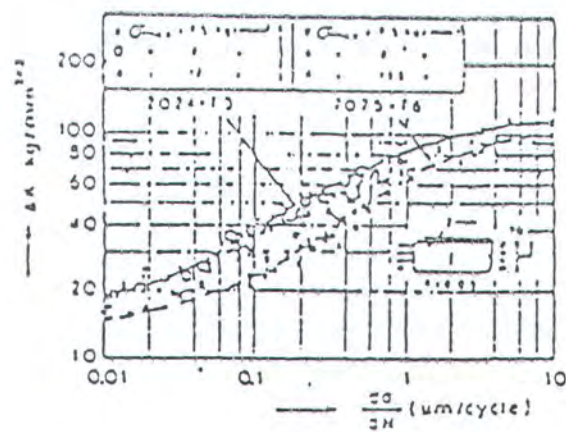
Dengan ΔK dalam $\text{MPa}\sqrt{m}$ dan da/dN dalam m/cycle yang sesuai dengan batas atas penjalaran retak lelah pada beberapa baja ferritic dalam lingkungan udara yang penjalarnya terjadi dipengaruhi formasi striation. Batas atas striation hukum penjalaran retak digunakan dalam estimasi bagian kritis dari penjalaran retak dalam lingkungan udara normal.

3.4. Hubungan Penjalaran Retak dengan Faktor Intensitas Tegangan

Pada keadaan elastik faktor intensitas tegangan merupakan parameter yang cukup dapat menggambarkan medan tegangan pada ujung retak. Jika ukuran daerah plastik pada ujung mempunyai harga yang lebih kecil bila dibandingkan dengan panjang retak maka faktor intensitas tegangan akan dapat menunjukkan dengan baik keadaan daerah tegangan pada ujung retak. Apabila dua retak yang berbeda mempunyai keadaan daerah tegangan yang sama hal ini bisa dikatakan kedua retak itu juga akan sama sehingga akan menunjukkan harga penjalaran retak yang sama.

Harga penjalaran retak kelelahan untuk setiap siklusnya (da/dN) dipengaruhi oleh rentang intensitas tegangan (ΔK) yang dapat dinyatakan dalam hubungan :

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) = f(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot \sqrt{\pi a} = f(2 \cdot \sigma_a \cdot \sqrt{\pi a}) \quad (3.14)$$



Gambar (3.13) Hubungan antara faktor intensitas tegangan dengan laju penjaralan retak

Dari persamaan yang dikemukakan oleh Paris bahwa data-data titik yang diperoleh dari spesimen yang diuji pada tingkat tegangan yang bermacam-macam yang seluruhnya berada dalam kurva yang tunggal. Gambar (3.13) menunjukkan pembentukan kurva dari data yang diperoleh pada tingkat tegangan yang berbeda, tetapi dalam keadaan tegangan minimum dalam setiap siklus selalu mendekati nol (ratio siklus tegangan $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = 0.05$). Data dari gambar (3.13) sesuai dengan persamaan (3.14)

Pembentukan kurva dalam bentuk data logaritma antara harga da/dN dengan ΔK akan menunjukkan bentuk garis lurus (straight line), walaupun demikian persamaan diatas tidak dapat mewakili secara keseluruhan keadaan

yang sebenarnya. Hal ini disebabkan bentuk kurva data yang sebenarnya adalah berbentuk S atau masing-masing tahap proses kelelahan mempunyai gradien garis yang bervariasi. Pada harga ΔK yang rendah dari bentuk penjaran retak yang ekstrim berlangsung sangat lambat. Hal ini dikarenakan pada keadaan itu harga ΔK dalam ambang (threshold). Keadaan ini dapat dijumpai dalam interpretasi hasil yang mengalami kesukaran dalam mengetahui pengaruhnya dalam pengujian.

Jumlah pertumbuhan retak tiap siklusnya erat kaitannya dengan displasemen terbukanya ujung retak. Oleh sebab itu hubungan antara harga penjaran retak dengan displasemen bukaan retak dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan yang menyatakan fungsi dan rentang intensitas tegangan dengan tegangan luluh pada saat pembebanan berulang

$$\frac{da}{dN} = C \frac{(\Delta K)^2}{E \cdot \sigma_{yc}} \quad \text{atau} \quad \frac{da}{dN} = C \left[\frac{\Delta K}{E} \right]^2 \quad (3.15)$$

dimana E adalah modulus Young dan σ_{yc} adalah tegangan luluh pada pembebanan yang berulang. Persamaan ini sangat menarik karena harga penjaran retaknya mempertimbangkan konsekuensi dari bentuk geometri dari bukaan pada ujung retak. Dari persamaan tersebut menunjukkan bahwa material yang dengan modulus young yang sama dapat mempunyai perbedaan properti penjaran retaknya.

Proses siklus kelelahan dapat didefinisikan dengan frekuensi dan dua parameter tegangan yaitu tegangan rata-rata σ_m dan amplitudo tegangan σ_a

sehingga besarnya tegangan minimum dapat dinyatakan $\sigma_{\min} = \sigma_m - \sigma_a$ dan tegangan maksimum dapat dinyatakan juga $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$. Untuk harga ratio tegangan $R=0$ maka besarnya tegangan maksimumnya dapat dinyatakan sebagai $\sigma_{\max} = 2\sigma_a = \Delta\sigma$. Hipotesis untuk harga penjalaran retak adalah sebagai fungsi faktor intensitas tegangan. Jika $R \neq 0$ maka harga rentang intensitas tegangannya $\Delta K = 2\sigma_a \cdot \sqrt{\pi a}$ yang tidak cukup untuk menggambarkan keadaan daerah tegangan disekitar ujung retak atau jika dinyatakan dalam faktor intensitas tegangan maksimum hasilnya akan sama saja.

Apabila untuk harga $R < 0$ misalnya dengan terjadinya tegangan kompresi pada keadaan yang demikian ini ternyata harga penjalaran retak tidak mengalami penambahan sehingga pada keadaan yang demikian hanya berlaku hubungan

$$\frac{da}{dN} = f(K_{\max}) \quad \text{untuk } R < 0 \quad (3.16)$$

Dalam bentuk pembebanan yang demikian retak tidak selalu menutup dengan tepat pada gerakan tegangan balik dari tarik ke tekan. Gerakan menutup tergantung pada besar bukaan yang terjadi pada ujung retak yang terjadi, sehingga persamaannya dimodifikasi dalam bentuk

$$\frac{da}{dN} = f_1(\Delta K, K_{\max}) = f_2(K_{\max}, R) \quad \text{untuk } R > \delta \quad (3.17)$$

$$\frac{da}{dN} = f_3(K_{\max}) \quad \text{untuk } R < \delta \quad (3.18)$$

dimana δ = properti material ≈ 0

Hubungan harga penjalaran retak dengan faktor intensitas tegangan sangat berguna, karena faktor intensitas tegangan ini dapat dihitung untuk beberapa macam geometri desain.

BAB IV

BEBAN DINAMIS

4.1. Tinjauan Umum

Beban dinamis merupakan salah satu penyebab terjadinya kegagalan struktur. Beban dinamis ini besarnya berfluktuasi menurut fungsi waktu. Kenyataannya beban dinamis yang ada di kapal besarnya dan bentuknya tak beraturan (irregular) atau sering disebut sebagai beban acak (random). Maka untuk dalam perhitungan atau perencanaan struktur digunakan pendekatan secara matematis dengan menganggap sebagai bentuk beban yang beraturan menurut fungsi waktu. Misalnya bentuk beban sinusoidal, trochiodal, triangular dan sebagainya.

Salah satu dari beban dinamis yang sering menjadi masalah yang menyebabkan kegagalan struktur adalah getaran. Dalam getaran permasalahan yang menyebabkan kerusakan atau perubahan bentuk struktur tidak hanya diakibatkan oleh beban dan tegangan saja, tetapi dapat disebabkan oleh displasemen respon. Secara umum permasalahan getaran ini dapat dibedakan menjadi dua yaitu getaran bebas dan getaran paksa, dapat dikatakan bahwa beban dinamis merupakan bagian dari salah satu bentuk getaran paksa. Getaran paksa dapat dibedakan menjadi dua yaitu eksitasi getaran yang berupa displasemen (base excitation) dan eksitasi yang berupa gaya (force excitation).

Pada permasalahan dalam beban dinamis yang menyebabkan kegagalan fatik ini lebih banyak kaitannya dengan getaran eksitasi yang disebabkan oleh gaya. Sumber eksitasi yang paling berpengaruh pada getaran kapal adalah :

- Propeller
- Mesin induk
- Gelombang laut

Dari ketiga sumber eksitasi diatas, eksitasi propeller ternyata merupakan sumber getaran yang tiap kali menimbulkan permasalahan, sedangkan sumber eksitasi lainnya pada umumnya mempunyai frekuensi yang berada diluar frekuensi natural struktur

Eksitasi propeller timbul karena putaran propeller melalui daerah dimana distribusi wake yang tidak uniform. Pada daerah dimana wake-nya besar akan terjadi kenaikan daya dorong (thrust). Untuk N daun propeller pada tiap putaran akan terjadi N kali kenaikan thrust, sehingga dapat didefinisikan besarnya frekuensi eksitasi yang sering disebut blade rate frequency sebagai berikut :

$$f = \frac{RPM \times N}{60} \quad (4.1)$$

dimana : RPM = putaran propeller permenit

N = jumlah daun (blade) propeller

60 = merupakan faktor konversi dari menit ke detik

(1menit = 60 detik)

4.2. Getaran

Getaran dapat dikatakan sebagai gerakan relatif secara berulang dalam interval waktu tertentu dari suatu struktur/sistem yang mempunyai massa dan fleksibilitas. Dengan adanya pengaruh perubahan waktu maka persoalan getaran dengan sendirinya merupakan permasalahan dinamis. Permasalahan mengenai getaran yang diakibatkan eksitasi gaya diidentikkan dalam beban dinamis yang menyebabkan kegagalan fatik, kegagalan ini akan semakin cepat jika terjadi resonansi yaitu jika nilai frekuensi natural bertepatan dengan nilai dari frekuensi eksitasinya (pembebanan).

4.2.1. Frekuensi Natural

Frekuensi sistem tanpa damping dan tanpa eksitasi yaitu apabila sistem diganggu dari keseimbangannya kemudian dibiarkan bergetar disebut frekuensi natural. Secara umum rumus frekuensi natural adalah sebagai berikut :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{hertz}) \quad (4.2)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (\text{rad/det}) \quad (4.3)$$

dimana k = konstanta kekakuan sistem

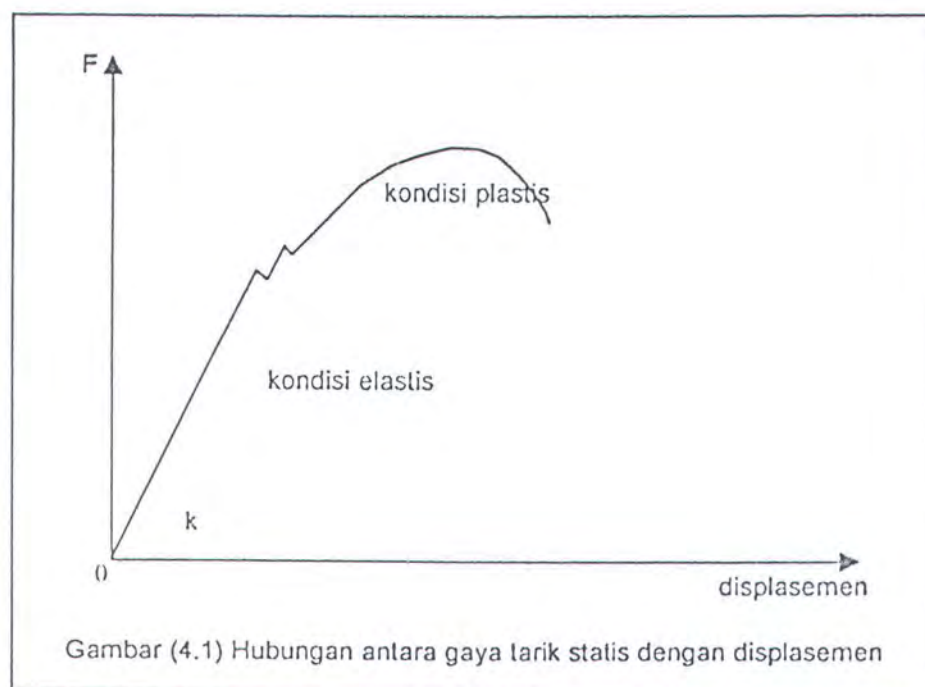
m = massa sistem

Dalam getaran harga k didefinisikan sebagai besarnya gaya yang diperlukan untuk setiap pertambahan displacemen atau secara sederhana

dapat dinyatakan sebagai : $k = \frac{F}{\Delta}$ (4.4)

dimana F = gaya dan Δ = pertambahan displasemen

Sehingga secara matematis hubungan gaya dan displasemen dapat ditunjukkan pada gambar (4.1) untuk sistem material dalam perilaku elastis. Dalam gambar (4.1) harga k ditunjukkan sebagai gradien garis dari hubungan gaya dan displasemen.



4.2.2. Getaran paksa dengan gaya eksitasi

Yang dimaksud dengan getaran paksa adalah getaran yang terjadi karena dikenakannya eksitasi kontinyu terhadap sistem. Pada dasarnya ada dua jenis eksitasi yaitu :

- Eksitasi yang berupa pergeseran /displasemen (base excitation)
- Eksitasi yang berupa gaya (force excitation)

Pada pembahasan kali ini dibatasi hanya pada eksitasi yang berupa gaya (force excitation).

Besarnya gaya eksitasi dari luar dinyatakan dalam fungsi waktu. Dan bentuk sederhana gaya eksitasi dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan beban sinusoidal tergantung dari waktu.

$$f(t) = F \cos \omega t \quad (4.5)$$

dimana : F = amplitudo gaya eksitasi

ω = frekuensi eksitasi

Secara sederhana bentuk persamaan getaran paksa dengan eksitasi untuk pemodelan dengan satu derajat kebebasan seperti pada gambar (4.2) dapat diturunkan dari hukum Newton II sebagai berikut :

$$\sum F = m\ddot{x} \quad (4.6)$$

$$f(t) - f_s - f_d = m\ddot{x}$$

$$f_s = kx$$

$$f_d = c\dot{x}$$

dimana : f_s = gaya pegas

f_d = gaya redaman

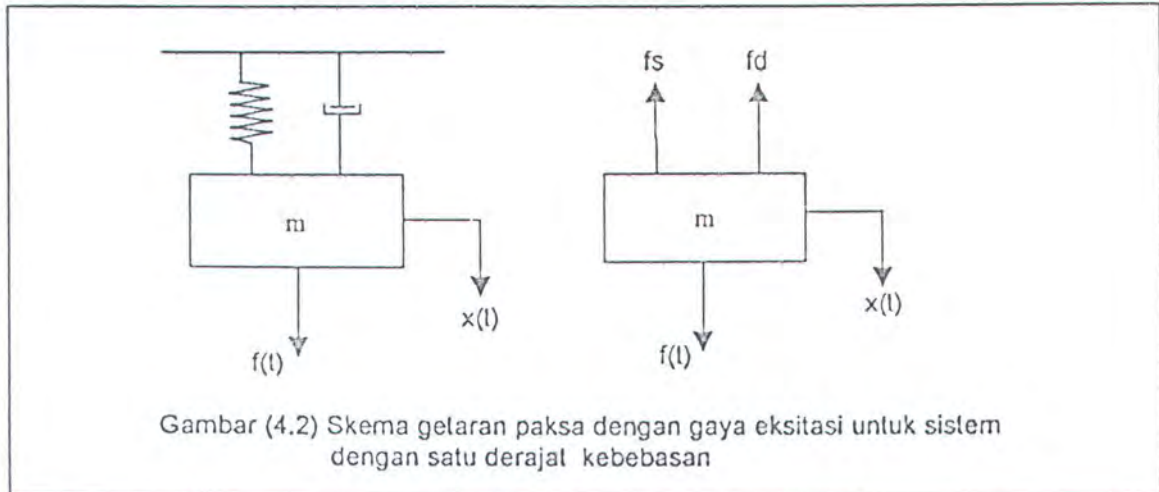
k = koefisien kekakuan

c = koefisien redaman

x = respon displasemen

\dot{x} = kecepatan

\ddot{x} = percepatan



Sehingga harga gaya pegas dan gaya redaman bila disubstitusikan ke persamaan (4.6) menjadi persamaan deferensial ordo dua sebagai berikut :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (4.7)$$

Persamaan matematis (4.7) dapat diselesaikan dengan memisalkan harga respon displasemen sebagai berikut :

$$x(t) = X \cos(\omega t - \varphi) \quad (4.8)$$

dimana : X = amplitudo respon displasemen

φ = sudut fase

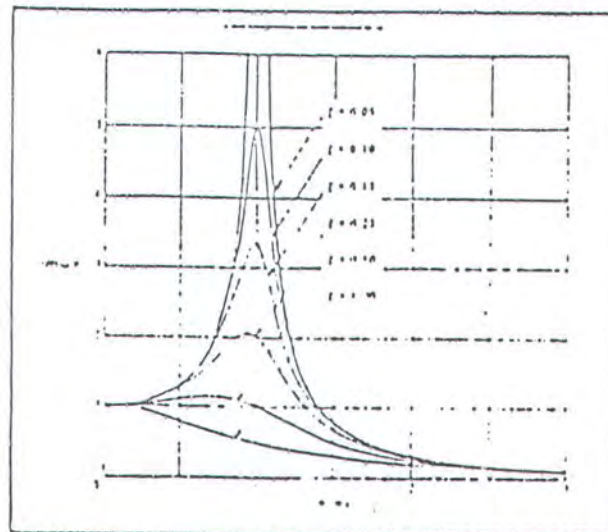
Dengan mensubstitusikan harga respon displasemen kedalam persamaan (4.7) maka akan didapatkan penyelesaian harga amplitudo respon dan sudut fase sebagai berikut :

$$X = \frac{F/k}{\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left(2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (4.9)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right\} \quad (4.10)$$

Hubungan amplitudo respon dan frekuensi natural dapat dinyatakan dalam bentuk hubungan antara magnificant factor dengan rasio frekuensi eksitasi dan frekuensi natural. Dan harga magnificant factor $H(\omega)$ dapat dinyatakan sebagai perbandingan amplitudo respon dengan faktor gaya F/k seperti berikut :

$$H(\omega) = \frac{X}{F/k}$$



Gambar (4.3) Hubungan magnificant factor dengan rasio frekuensi

$$X = \frac{F/k}{\left\{ \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (4.9)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left\{ \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \right\} \quad (4.10)$$

Hubungan amplitudo respon dan frekuensi natural dapat dinyatakan dalam bentuk hubungan antara magnificant factor dengan rasio frekuensi eksitasi dan frekuensi natural. Dan harga magnificant factor $H(\omega)$ dapat dinyatakan sebagai perbandingan amplitudo respon dengan faktor gaya F/k seperti berikut :

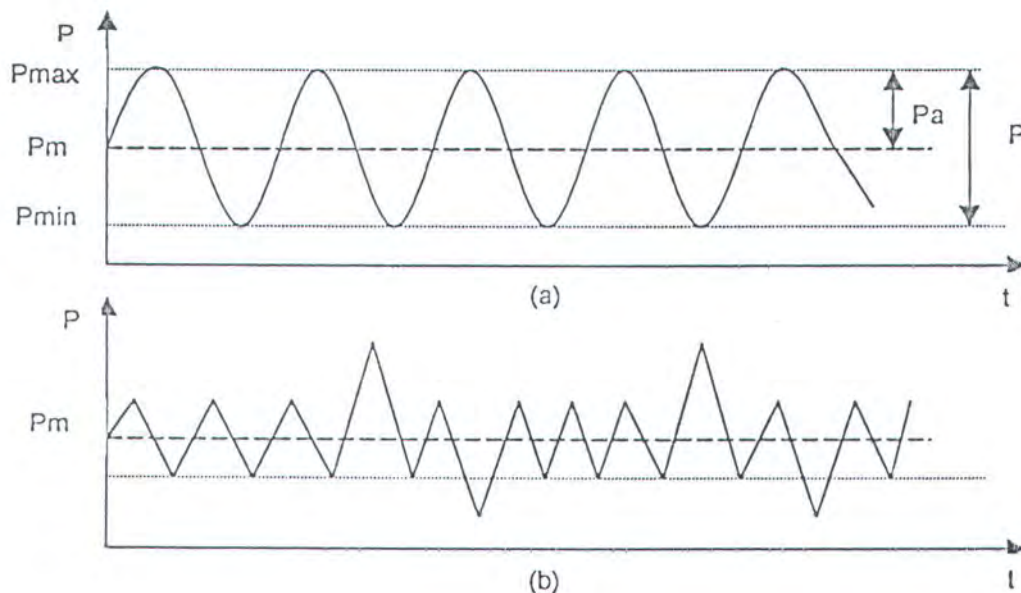
Gambar (4.3) Hubungan magnificant factor dengan rasio frekuensi

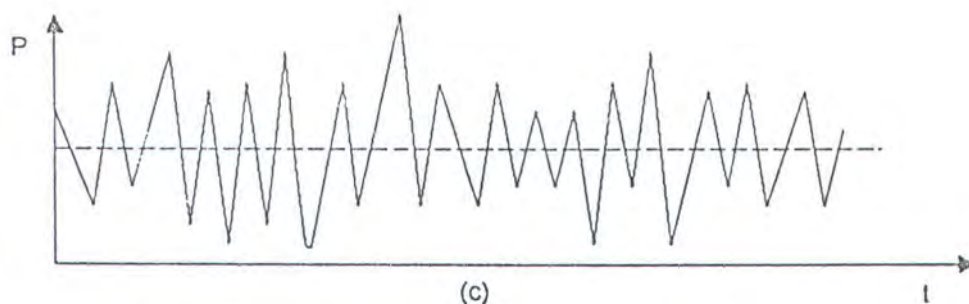
Pada gambar (4.3) menunjukan apabila harga frekuensi eksitasi mendekati frekuensi natural atau rasionya mendekati 1 maka harga manifest factornya akan menjadi tak terhingga untuk harga ζ , faktor damping yang kecil. Dan ini akan mempengaruhi harga amplitudo respon.

Keterkaitan permasalahan ini dengan kelelahan didasarkan pada pendapat Laird yang menyatakan bahwa harga laju penjalaran retak besarnya berbanding lurus dengan pertambahan displasemen (displasemen bukan retak).

4.3. Parameter Beban Dinamis

Dalam pengembangan bentuk beban dinamis sangat ditentukan oleh parameter yang ada.





Gambar (4.4) Bentuk-bentuk beban dinamis.

- (a) Beban dinamis dengan amplitudo konstan
- (b) Beban dinamis dengan variable amplitudo beban
- (c) Beban dinamis dengan amplitudo acak

Parameter-parameter ini dapat untuk memepermudah perhitungan beban dinamis secara matematis. Secara umum beban dinamis yang menyebabkan kegagalan struktur dapat dibagi menjadi tiga bagian seperti pada gambar (4.4).

1. Beban dinamis dengan amplitudo konstan (constan amplitude loads) yang dapat dibedakan lagi menjadi beban seperti sinusoidal, triangular, positive saw tooth, negative saw tooth dan sebagainya.
2. Beban dinamis dengan amplitudo yang bervariasi (variable amplitude loads) yang dapat dibedakan single atau multiple overload dan block programmed loading.
3. Beban dinamis dengan amplitudo beban acak (random amplitude loads).

Beban dinamis 1 dan 2 ini sering dipakai dalam pengujian di laboratorium, sedangkan untuk beban 3 merupakan bentuk beban dinamis yang menggambarkan keadaan sebenarnya.

Parameter-parameter beban yang sedikit banyak mempengaruhi bentuk beban dan kegagalan fatik struktur yang didefinisikan sebagai berikut :

- Beban maksimum, P_{\max} adalah beban pada proses fatik yang mempunyai harga tertinggi dalam siklusnya. Beban ini dapat dianggap sebagai beban tarik bila mempunyai harga positif dan dapat dianggap sebagai beban tekan apabila mempunyai harga negatif.
- Beban minimum, P_{\min} adalah beban yang dalam proses fatik mempunyai harga terendah dalam siklusnya. Beban ini dapat dianggap sebagai beban tarik apabila mempunyai harga positif dan dianggap sebagai beban tekan apabila mempunyai harga negatif.
- Rentang beban, ΔP adalah dalam proses fatik yang merupakan beda antara beban maksimum dengan beban minimum dalam siklusnya, yang bisa dinyatakan sebagai:

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad (4.11)$$

- Rasio beban, R adalah perbandingan antara beban minimum dengan beban maksimum dalam siklus fatik, yang dapat dinyatakan sebagai :

$$R = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (4.12)$$

- Siklus beban, N adalah menyatakan jumlah siklus beban pada proses fatik, dimana satu siklus beban menyatakan satu periodik beban yang terjadi menurut fungsi waktu.
- Frekuensi beban, f adalah jumlah siklus beban yang dilakukan dalam satu-satuan waktu.
- Amplitudo beban, P_a menyatakan simpangan beban maksimum yang dilakukan dalam proses fatik, untuk amplitudo beban konstan maka hubungan harga amplitudo dapat ditentukan sebagai berikut :

$$P_a = \frac{1}{2}(P_{\max} - P_{\min}) \quad (4.13)$$

- Beban rata-rata, P_m menyatakan harga beban yang terjadi dalam setiap siklus fatik. Untuk bentuk beban dengan amplitudo yang konstan maka besarnya tegangan rata-rata dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_m = \frac{1}{2}(P_{\max} + P_{\min}) \quad (4.14)$$

Definisi parameter beban diatas merupakan definisi beban yang menyebabkan siklus kegagalan fatik struktur.

BAB V

PERSIAPAN DAN PELAKSANAAN PENGUJIAN

5.1. Tinjauan Umum

Pengamatan secara fisik pada proses laju perambatan retak terhadap perubahan frekuensi pembebanan pada material tertentu dilakukan dengan pengujian fatik pada kondisi amplitudo beban yang konstan. Pengujian ini dilaksanakan pada kondisi udara normal dengan beberapa penyederhanaan untuk mengantisipasi keterbatasan yang ada. Pada pengujian ini pengamatan terutama dilakukan pada karakteristik panjalaran retak dengan adanya pengaruh dari frekuensi pembebanan pada plat yang berpanegar. Dari pengujian ini akan didapatkan hasil perambatan retaknya, jumlah siklus pembebanannya dan besar rentang bebannya. Kemudian harga perambatan retak dapat dihitung dari data tersebut. Demikian juga untuk rentang faktor intensitas tegangannya (range stress intensity factor). Dan hasil akhir yang akan dianalisa adalah bentuk grafik laju perambatan retak dengan rentang faktor intensitas tegangan terhadap frekuensi pembebanannya.

Pengujian meliputi pengujian tarik (tensile test) untuk menentukan mechanical property material dan pengujian kelelahan (fatigue test) yang digunakan untuk mengetahui perambatan retaknya. Spesimen untuk kedua pengujian tersebut berasal dari material yang sama dengan dilakukan machining untuk membentuk spesimen dari masing-masing pengujian. Pada

spesimen uji kelelahan, selain spesimen normal (seperti pada petunjuk standart) juga dibentuk spesimen lain dengan dipasang penegar sebagai penambah kekakuan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan acuan dari ASTM (American Society for Testing Materials) mengenai metoda pengujian tarik dan pengujian kelelahan.

Sarana yang digunakan dalam pengujian ini melibatkan tiga laboratorium yaitu: laboratorium kekuatan dan konstruksi, laboratorium produksi dan laboratorium teknologi mekanik. Peralatan yang digunakan dalam pengujian ini antara lain: mesin uji statis-dinamis, mesin uji statis, mesin skrap, mesin bor, mesin gergaji dan peralatan manual seperti gergaji tangan, kikir, kertas gosok. Pelaksanaan dan persiapan pengujian ini sepenuhnya dilakukan oleh mahasiswa dibantu oleh teknisi laboratorium dan dibimbing oleh dosen pembimbing.

5.2. Pengujian Tarik (Tensile Test)

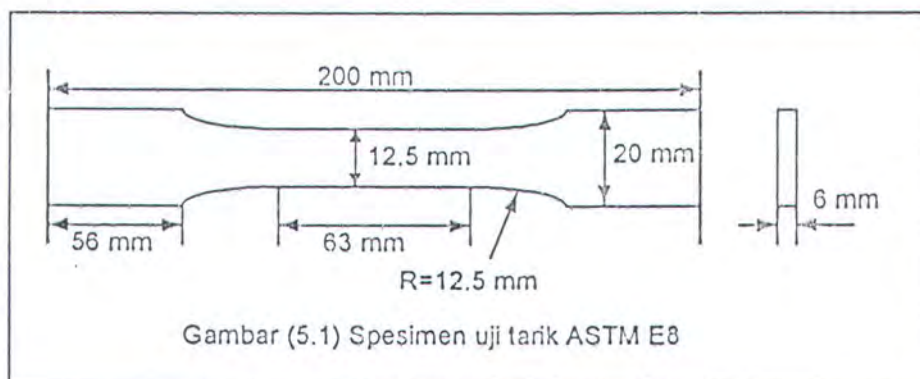
5.2.1. Karakteristik Pengujian

Pengujian tarik dilakukan untuk mendapatkan harga tegangan luluh (yield stress) dan tegangan ultimat (ultimate stress). Pembagian tegangan luluh dengan luasan penampang spesimen menghasilkan harga kekuatan luluh (yield strength) material. Hasil perhitungan kekuatan luluh inilah yang kemudian digunakan dalam penentuan besarnya pembebanan pada pengujian kelelahan. Perhitungan persentase tegangan yang dialami oleh spesimen uji kelelahan

dihitung secara numerik dengan menggunakan perhitungan elemen hingga. Dalam pengujian kelelahan yang akan dilakukan yaitu kalibrasi antara harga pembebanan yang ditunjuk oleh mesin pengujian tarik dengan harga indikator yang terdapat pada panel kontrol mesin pengujian kelelahan. Hasil kalibrasi tersebut kemudian dijadikan patokan nilai minimum dan maksimum dari siklus pembebanan.

5.2.2. Standar Spesimen

Material yang akan digunakan sebagai benda uji dipilih jenis material yang sering dipakai dalam perkapalan yaitu material baja lunak (Mild Steel) jenis SS-41. Dan standar uji yang dipakai ASTM E 8m. Pada perencanaan spesimen uji tarik dalam ASTM terdapat bermacam-macam tipe, dalam perencanaan ini dipilih tipe Sheet. Hal ini disebabkan ketebalan yang disyaratkan adalah antara 0.13mm sampai 16mm, sedangkan ketebalan material yang akan diuji adalah 6mm. Bentuk dan ukuran spesimen yang disyaratkan oleh ASTM seperti ditunjukkan pada gambar (5.1).



Pada pelaksanaan pembuatan spesimen uji tarik material dipotong dengan gergaji mesin disesuaikan dengan panjang dan lebar yang disyaratkan dengan memberi kelebihan ukuran sekitar 3mm untuk pembentukannya. Selanjutnya material dibentuk sesuai dengan persyaratan dengan menggunakan sekrap. Dan untuk proses akhir diselesaikan dengan menggunakan kikir untuk menyesuaikan ketepatan ukurannya.

5.2.3. Prosedur dan Pengujian

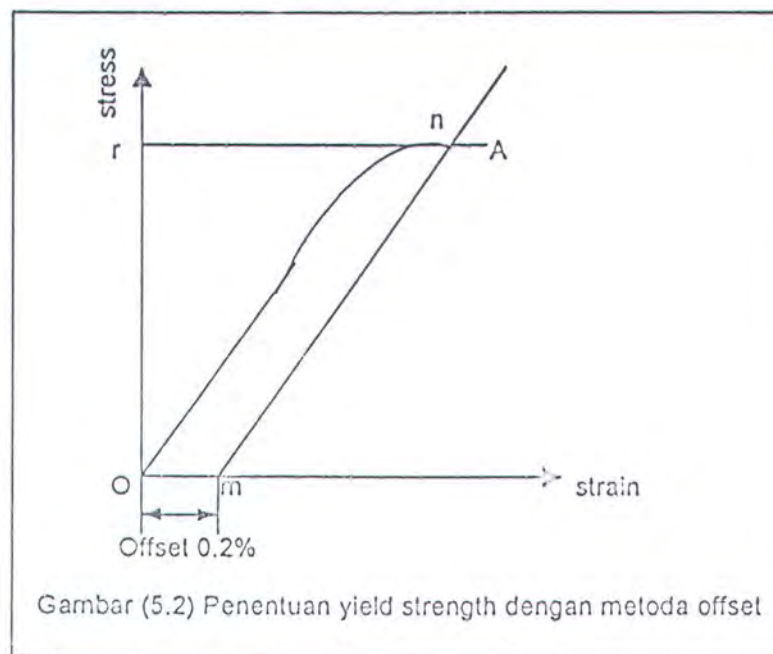
Untuk Mendapatkan hasil yang tepat, pelaksanaan pengujian harus didasarkan prosedur standar, baik dalam penarikan spesimen maupun dalam pengukuran dan analisisnya. Dalam hal ini prosedur yang dipakai adalah yang distandarkan oleh ASTM.

1. Pengukuran Dimensi Spesimen Pengujian

Penentuan luas penampang spesimen uji dilakukan dengan mengukur dimensi dari penampang pada bagian tengah spesimen. Pada spesimen dengan ukuran terkecil dibawah 5mm, maka luas penampang terkecil yang dijadikan sebagai harga luasan penampang. Toleransi ukuran yang diijinkan pada spesimen dengan ukuran 5mm dan tidak kurang dari 2.5mm pengukuran dilakukan sampai dengan harga 0.01mm terdekat. Pada spesimen yang lebih kecil lagi pengukuran dilakukan sampai dengan 0,002mm terdekat.

2. Penentuan Kekuatan Luluh (Yield Strength)

Salah satu metode yang dapat digunakan dalam penentuan kekuatan luluh material adalah dengan menggunakan metode offset. Metode ini dipakai pada material yang tidak menunjukkan gejala diskontinuitas saat melakukan regangan sebagai akibat dari tegangan yang dialaminya. Untuk menggunakan cara ini diperlukan adanya pencatatan hasil dalam bentuk grafik (diagram tegangan regangan) sehingga pengukuran offset dapat dilakukan. Setelah penentuan besar offset dilakukan pada diagram tersebut ditarik garis O_m sebesar jarak tertentu sesuai dengan besarnya nilai offset. Kemudian dibuat garis mn yang sejajar dengan OA dan ditentukan r sebagai perpotongan antara mn dengan diagram tegangan regangan tersebut. Bila metode offset ini digunakan dalam penentuan kekuatan luluh suatu material maka pada hasil yang didapatkan harus dicantumkan juga besarnya nilai offset yang dipakai.



3. Penentuan Titik Luluh (yield point)

Pada material yang menunjukkan peluluhan secara tidak kontinyu diperlukan metode lain dalam penentuan titik luluhnya. Penentuan titik luluh ini lebih mudah dilakukan karena adanya diskontinuitas pada regangan material pada saat pembebanan dilakukan. Cara yang paling mudah dilakukan adalah dengan memakai alat pencatat yang secara grafis menggambarkan diagram tegangan regangan selama spesimen ditarik. Titik diskontinuitas yang terjadi pada kurva tegangan regangan tersebut merupakan titik luluh (yield point) dari material tersebut.

4. Penentuan Kekuatan Tarik.

Perhitungan kekuatan tarik dilakukan dengan melakukan pembagian beban maksimum yang diberikan pada spesimen selama pengujian dengan besarnya luasan penampang awal (luasan penampang sebelum pembebanan pada spesimen dilakukan).

5. Penambahan Panjang (Elongation)

Pada penentuan penambahan panjang yang terjadi selama pengujian dilakukan harus disebutkan juga harga awal dari panjang pengukuran (gage length) dan prosentase penambahan. Pada spesimen dengan pertambahan panjang lebih dari 3%, pengukuran dilakukan dengan memasang kembali kedua bagian spesimen yang patah tersebut pada permukaan patahnya. Pengukuran kemudian dapat dilakukan terhadap jarak antara kedua tanda

pengukuran sampai dengan harga 0.25mm terdekat untuk jarak pengukuran 50mm atau lebih.

5.2.4. Hasil Pengujian

Dari hasil pengujian statis, setelah spesimen ditarik sampai patah adalah sebagai berikut :

Material : SS 41

Ultimate stress : 30.25 KN

Yield stress : 22 KN

Elongation : 32.19%

Yield Strength : 210.53 N/mm² (offset 0.2%)

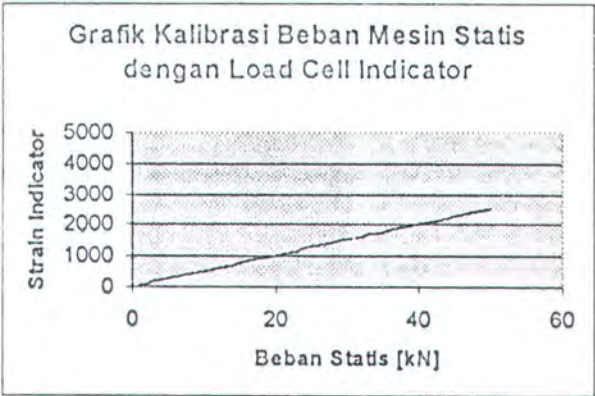
5.3. Kalibrasi Beban

Agar dapat menentukan beban yang bekerja pada mesin dinamis dari pengamatan angka digital yang ditunjukkan oleh indikator maka perlu dilakukan kalibrasi beban untuk mencapatakan kesetaraan antara load cell pada mesin uji statis dinamis dengan mesin statis. Proses kalibrasi ini dilakukan dengan memasang load cell beban pada mesin uji statis yang selanjutnya dilakukan pembacaan angka pada indikator dan pada uji statis dengan menaikkan beban setiap satu kilo Newton.

Dari hasil kalibrasi beban tersebut dapat dibentuk grafik kalibrasi beban yang akan digunakan sebagai acuan dalam menentukan besarnya beban yang akan dipakai dalam pengujian. Dari hasil kalibrasi beban didapat tabel sbb :

Beban Mesin Statis (kN)	Strain Indicator	Beban Mesin Statis (kN)	Strain Indicator
1	54	26	1321
2	109	27	1369
3	161	28	1419
4	212	29	1466
5	264	30	1509
6	313	31	1565
7	361	32	1623
8	413	33	1677
9	460	34	1718
10	509	35	1765
11	560	36	1823
12	608	37	1873
13	649	38	1922
14	710	39	1973
15	759	40	2022
16	811	41	2078
17	864	42	2126
18	912	43	2172
19	965	44	2223
20	1016	45	2275
21	1069	46	2328
22	1118	47	2375
23	1166	48	2423
24	1221	49	2473
25	1269	50	2525

Hubungan antara indikator load cell dan beban statis dapat digambarkan grafik regresi seperti dibawah ini.



$$Y = 50.53613X - 0.4114286$$

Gambar (5.3) Grafik kalibrasi beban mesin statis dengan load cell indicator

5.4. Pengujian Kelelahan

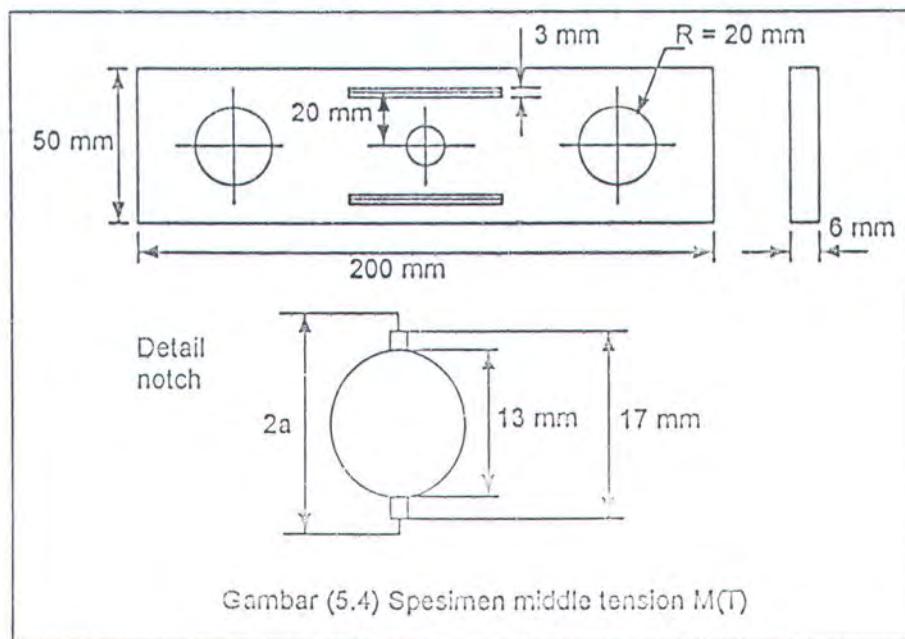
5.4.1. Karakteristik Pengujian

Pengujian kelelahan ini dilakukan dengan amplitudo beban yang konstan dan memakai frekuensi yang berubah. Prosedur pelaksanaan pengujian dipakai standart uji ASTM E 647-86. Dan bentuk beban yang dipakai sinusoidal.

Karakteristik yang diamati pada pengujian ini adalah laju penjaran retak akibat frekuensi yang berubah. Analisa hasil pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil uji kelelahan spesimen fatigue standar (tanpa penegar) dengan hasil yang didapat dari spesimen fatigue dengan penegar yang arahnya melintang dari arah perambatan retak.

5.4.2. Standar Spesimen

Persiapan spesimen didasarkan pada standar ASTM E 647-86 mengenai pengujian penjaran retak kelelahan dengan memakai amplitudo pembebanan konstan. Geometri dari spesimen standar baik untuk C(T) maupun M(T) mengacu pada standar yang telah diberikan tersebut. Untuk spesimen M(T) seperti yang dipakai dalam pengujian ini, penentuan ukuran spesimen dilakukan dengan memperhatikan metoda pemegangan yang digunakan. Bentuk dan ukuran spesimen yang digunakan dan detail takikan adalah seperti dibawah ini.



Beberapa persyaratan yang dicantumkan dalam standar ASTM dengan catatan mengenai penyesuaian yang dilakukan menurut keadaan alat-alat dan perlengkapan yang tersedia pada saat pengujian dilakukan.

1. Pembebanan ideal yang diharapkan mempunyai rasio (R) sebesar nol, karena adanya keterbatasan mesin uji kelelahan maka beban yang dipakai adalah beban berulang tarik-tarik (tension-tension) dengan membatasi nilai tersebut sekecil mungkin. Rasio yang dipakai selama pengujian sebesar 0.07 berada didalam interval yang diijinkan antara 0 sampai dengan 0.2.
2. Diameter lubang untuk baut pegangan spesimen dengan diameter sebesar $W/3$ dalam pengujian tidak lagi bergantung pada W , hal ini terjadi karena baut dan lubang yang terdapat pada grip pemegang yang tersedia mempunyai diameter sebesar 20 mm.

3. Takikan buatan pada spesimen M(T) sebesar 2a dibuat tepat pada garis tengah dengan toleransi sebesar sekitar 0.001 W. Panjang takikan tersebut lebih ditentukan pertimbangan praktis pada pengujian. Dengan tidak adanya pembatasan panjang takikan pada spesimen tersebut dibuat takikan sepanjang 2mm pada tiap sisi.
4. Ketebalan yang dianjurkan berkisar antara W/8 sampai dengan W/4 untuk spesimen M(T). Tebal spesimen yang dipakai adalah 6mm sehingga masih berada di bawah tebal maksimum (6.25mm) dengan lebar spesimen (W) sebesar 5mm.
5. Hasil yang akurat untuk pengetesan ini membutuhkan keadaan elastis yang dominan pada spesimen sedangkan ukuran minimum yang diperlukan untuk mencapai keadaan tersebut adalah sebagai berikut

$$(W - a) \geq 1.25 P_{\max} / (B \sigma_{ys})$$

dimana (W-a) = bagian spesimen yang tidak retak

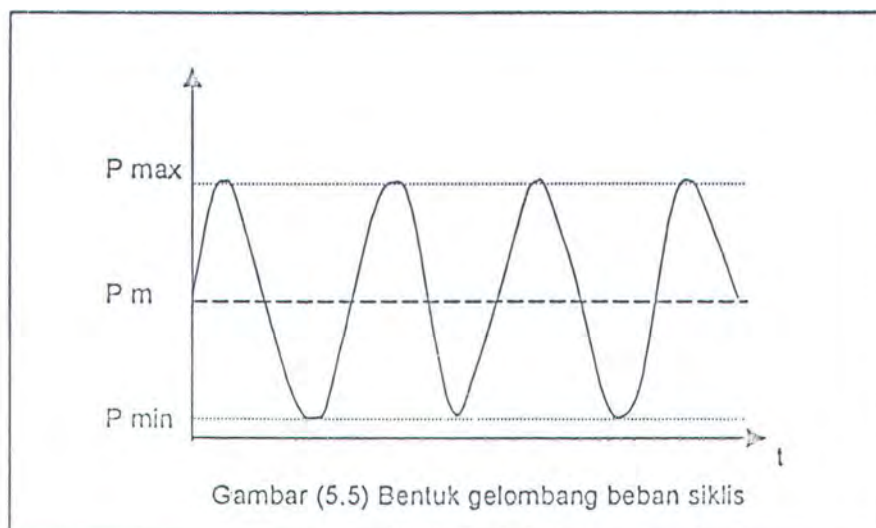
B = ketebalan spesimen

5.4.3. Prosedur dan Pelaksanaan Pengujian

1. Dari hasil pengujian tarik didapatkan besarnya kekuatan luluh (yield strength) adalah 210.53 N/mm². Maka tegangan nominal maksimum yang akan dipakai direncanakan mencapai 1/3 dari kekuatan luluh material yaitu :

$$\sigma_{app} = \frac{1}{3} (\sigma_{yield}) = 70.18 \frac{N}{mm^2}$$

2. Dengan bantuan software MSC/NASTRAN diketahui beban yang dipergunakan untuk spesimen tanpa penegar sebesar 13,45 kN dan untuk spesimen dengan penegar sebesar 19,4 kN. Dari harga tersebut dapat ditentukan angka yang akan ditunjukkan oleh strain indicator pada load cell dengan menggunakan persamaan kalibrasi beban yaitu : $y = 50.53613 x - 0.4114286$ dimana y adalah angka yang ditunjukkan oleh strain indicator dan x adalah beban statis dalam kilo Newton.
3. Setelah didapatkan besaran dari strain indicator yang dikehendaki, ditentukan besarnya rasio tegangan (R) atau pembebanan minimum dari siklus beban yang akan diberikan. Rasio yang diharapkan sedapat mungkin mendekati nol, dengan pertimbangan kemampuan mesin uji maka ditentukan rasio = 0.07. Beban minimum berkisar pada harga 0.9415 kN untuk spesimen tanpa penegar, spesimen dengan penegar sebesar 1.358 kN .



4. Dengan dasar pertimbangan waktu pengujian, pengamatan yang lebih teliti dan amplitudo yang konstan, maka frekuensi yang digunakan adalah 1 Hz, 1.6Hz dan 2.2 Hz. Untuk setiap spesimen dilakukan dengan dua macam frekuensi yang berbeda. Pada saat pelaksanaan besarnya beban maksimum dan minimum untuk setiap frekuensi adalah tetap, hal ini dimaksudkan agar amplitudo beban yang didapatkan adalah tetap konstan.
5. Urutan pemakaian frekuensi beban dapat disusun sebagai berikut :
 - Spesimen tanpa penggar
Spesimen I frekuensi yang digunakan 2.2Hz, 1.6Hz, 1Hz
Spesimen II frekuensi yang digunakan 1Hz, 1.6Hz, 2.2Hz
 - Spesimen dengan penggar
Spesimen III frekuensi yang digunakan 2.2Hz, 1.6Hz, 1Hz
Spesimen IV frekuensi yang digunakan 1Hz, 1.6Hz, 2.2Hz
6. Pengukuran panjang retak setiap frekuensi diukur pada kedua ujung retak sampai dengan 0.1mm atau 0.002W terdekat.

5.4.4. Hasil Pengujian

Hasil pencatatan panjang retak untuk tiap-tiap frekuensi pembebanan yang berbeda dibuat dalam bentuk tabulasi untuk memudahkan analisa. Dari data hasil pengujian selanjutnya akan diolah untuk menentukan variabel-variabel yang telah ditentukan dalam prosedur.

No.	f (Hz)	N	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)
1		0	20.51		
2		2000	20.89	0.19	10.35
3		4000	21.24	0.175	10.5325
4	2.2	6000	21.63	0.195	10.7175
5		8000	22.06	0.215	10.9225
6		10000	22.44	0.19	11.125
1		12000	22.57	0.065	11.2525
2		14000	22.68	0.055	11.3125
3		16000	22.8	0.06	11.37
4	1.6	18000	22.93	0.065	11.4325
5		20000	23.08	0.075	11.5025
6		22000	23.25	0.085	11.5825
1		24000	23.30	0.025	11.6375
2		26000	23.32	0.01	11.655
3		28000	23.38	0.03	11.675
4	1	30000	23.43	0.025	11.7025
5		32000	23.47	0.02	11.725
6		34000	23.53	0.03	11.75

Tabel (5.1) Hasil pengukuran panjang retak untuk spesimen I

No.	f (Hz)	N	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)
1		0	23.53		
2		2000	23.61	0.04	11.785
3		4000	23.71	0.05	11.83
4	1	6000	23.79	0.04	11.875
5		8000	23.88	0.045	11.9175
6		10000	23.96	0.04	11.96
1		12000	24.1	0.07	12.015
2		14000	24.24	0.07	12.085
3		16000	24.37	0.065	12.1525
4	1.6	18000	24.52	0.075	12.2225
5		20000	24.72	0.1	12.31
6		22000	24.94	0.11	12.415
1		24000	25.35	0.205	12.5725
2		26000	25.7	0.175	12.7625
3		28000	26.09	0.195	12.9475
4	2.2	30000	26.49	0.2	13.145
5		32000	26.91	0.21	13.35
6		34000	27.34	0.215	13.5625

Tabel (5.2) Hasil pengukuran panjang retak untuk spesimen II

No.	f (Hz)	N	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)
1		0	20.39		
2		2000	20.44	0.025	20.415
3		4000	20.48	0.02	20.46
4	2.2	6000	20.53	0.025	20.505
5		8000	20.59	0.03	20.56
6		10000	20.64	0.025	20.615
1		12000	20.68	0.02	20.66
2		14000	20.71	0.015	20.695
3		16000	20.73	0.01	20.72
4	1.6	18000	20.76	0.015	20.745
5		20000	20.79	0.015	20.775
6		22000	20.83	0.02	20.81
1		24000	20.83	0	20.83
2		26000	20.83	0	20.83
3		28000	20.83	0	20.83
4	1	30000	20.83	0	20.83
5		32000	20.83	0	20.83
6		34000	20.83	0	20.83

Tabel (5.3) Hasil pengukuran panjang retak untuk spesimen III

No.	f (Hz)	N	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)
1		0	20.83		
2		2000	20.83	0	20.83
3		4000	20.83	0	20.83
4	1	6000	20.83	0	20.83
5		8000	20.83	0	20.83
6		10000	20.83	0	20.83
1		12000	20.85	0.01	20.84
2		14000	20.86	0.005	20.855
3		16000	20.88	0.01	20.87
4	1.6	18000	20.89	0.005	20.885
5		20000	20.89	0	20.89
6		22000	20.9	0.005	20.895
1		24000	20.92	0.01	20.91
2		26000	20.95	0.015	20.935
3		28000	20.98	0.015	20.965
4	2.2	30000	21.00	0.01	20.99
5		32000	21.02	0.01	21.01
6		34000	21.04	0.01	21.03

Tabel (5.4) Hasil pengukuran panjang retak untuk spesimen IV

BAB VI

HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISA

6.1. Tinjauan Umum

Pada pengujian penjalaran retak dengan amplitudo beban yang konstan dan frekuensi pembebanan yang berubah, didapatkan data-data yang akan diolah dan dianalisa dengan berdasarkan pada dasar teori yang telah dibahas. Kekurangan data-data ini dapat disebabkan beberapa faktor, bisa disebabkan faktor manusia atau faktor prasarana pengujian, misalnya ketidakteelitian dalam pengukuran panjang retak yang disebabkan karena pengamatan yang kurang baik atau bisa juga dikarenakan keadaan prasarana yang kurang baik.

Penentuan analisa dari perhitungan data-data yang ada dan dianalisa terhadap pengamatan benda uji selama berlangsungnya pengujian. Dari hasil kedua analisa ini kemudian dibandingkan dengan berlandaskan dasar teori untuk menentukan kaitan dari hasil keduanya.

Hasil analisa ini bukan merupakan suatu harga yang dapat dipakai secara langsung dalam perhitungan fatigue life suatu struktur tetapi hasil ini hanya sebagai bahan masukan dalam merencanakan kelelahan struktur. Karena untuk mendapatkan suatu hasil yang dapat dipakai secara langsung dalam perencanaan struktur diperlukan pengujian benda uji yang lebih banyak untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

6.2. Pengolahan Data Pengujian

Data-data hasil pengujian didapatkan ukuran panjang retak untuk setiap selang siklus pembebanan, besarnya beban maksimum dan minimum yang dipakai selama pengujian. Dari data ini selanjutnya akan dilakukan perhitungan:

- Laju penjararan retak, da/dN
- Penentuan rentang faktor intensitas tegangan, ΔK
- Penentuan kekuatan sisa yang ditabulasikan dalam lampiran C

Dari hasil perhitungan ini selanjutnya dicari kaitannya masing-masing variabel diatas terhadap frekuensi dengan menggambarkannya dalam bentuk diagram, misalnya diagram laju penjararan retak terhadap rentang intensitas tegangan atau diagram kekuatan sisa dari material terhadap siklus pembebanan.

6.2.1. Perhitungan Laju Penjararan Retak

Dalam perhitungan laju penjararan retak ini data-data pengukuran dari pertambahan retak dilakukan sesuai dengan persyaratan yang ditentukan oleh ASTM. Harga rata-rata penjararan retak dari pengujian sesuai yang disyaratkan dalam standar uji yaitu diatas harga $10^{-8} m/cycle$. Berikut ini adalah perhitungan dari laju penjararan retak :

No.	f (Hz)	N (cycle)	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)
1	2.2	0	20.51				
2		2000	20.89	0.19	10.35	2000	9.5E-05
3		4000	21.24	0.175	10.5325	2000	8.75E-05
4		6000	21.63	0.195	10.7175	2000	9.75E-05
5		8000	22.06	0.215	10.9225	2000	0.0001075
6		10000	22.44	0.19	11.125	2000	9.5E-05
1	1.6	12000	22.57	0.065	11.2525	2000	3.25E-05
2		14000	22.68	0.055	11.3125	2000	2.75E-05
3		16000	22.8	0.06	11.37	2000	3E-05
4		18000	22.93	0.065	11.4325	2000	3.25E-05
5		20000	23.08	0.075	11.5025	2000	3.75E-05
6		22000	23.25	0.085	11.5825	2000	4.25E-05
1	1	24000	23.30	0.025	11.6375	2000	1.25E-05
2		26000	23.32	0.01	11.655	2000	5E-06
3		28000	23.38	0.03	11.675	2000	1.5E-05
4		30000	23.43	0.025	11.7025	2000	1.25E-05
5		32000	23.47	0.02	11.725	2000	1E-05
6		34000	23.53	0.03	11.75	2000	1.5E-05

Tabel (6.1) Perhitungan laju penjaran retak pada spesimen I

No.	f (Hz)	N	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)
1	1	0	23.53				
2		2000	23.61	0.04	11.785	2000	2E-05
3		4000	23.71	0.05	11.83	2000	2.5E-05
4		6000	23.79	0.04	11.875	2000	2E-05
5		8000	23.88	0.045	11.9175	2000	0.0000225
6		10000	23.96	0.04	11.96	2000	2E-05
1	1.6	12000	24.1	0.07	12.015	2000	3.5E-05
2		14000	24.24	0.07	12.085	2000	3.5E-05
3		16000	24.37	0.065	12.1525	2000	3.25E-05
4		18000	24.52	0.075	12.2225	2000	3.75E-05
5		20000	24.72	0.1	12.31	2000	5E-05
6		22000	24.94	0.11	12.415	2000	5.5E-05
1	2.2	24000	25.35	0.205	12.5725	2000	0.0001025
2		26000	25.7	0.175	12.7625	2000	8.75E-05
3		28000	26.09	0.195	12.9475	2000	9.75E-05
4		30000	26.49	0.2	13.145	2000	1E-04
5		32000	26.91	0.21	13.35	2000	0.000105
6		34000	27.34	0.215	13.5625	2000	0.0001075

(Tabel 6.2) Perhitungan laju penjaran retak pada spesimen II

No.	f (Hz)	N (cycle)	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)
1		0	20.39				
2		2000	20.44	0.025	10.2075	2000	1.25E-05
3		4000	20.48	0.04	10.23	2000	2E-05
4	2.2	6000	20.53	0.05	10.2525	2000	2.5E-05
5		8000	20.59	0.06	10.28	2000	3E-05
6		10000	20.64	0.05	10.3075	2000	2.5E-05
1		12000	20.68	0.04	10.33	2000	2E-05
2		14000	20.71	0.03	10.3475	2000	1.5E-05
3		16000	20.73	0.02	10.36	2000	1E-05
4	1.6	18000	20.76	0.03	10.3725	2000	1.5E-05
5		20000	20.79	0.03	10.3875	2000	1.5E-05
6		22000	20.83	0.04	10.405	2000	2E-05
1		24000	20.83	0.00	10.415	2000	0
2		26000	20.83	0.00	10.415	2000	0
3		28000	20.83	0	10.415	2000	0
4	1	30000	20.83	0.00	10.415	2000	0
5		32000	20.83	0.00	10.415	2000	0
6		34000	20.83	0	10.415	2000	0

Tabel (6.3) Perhitungan laju penjaran retak pada spesimen III

No.	f (Hz)	N	2a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)
1		0	20.83				
2		2000	20.83	0	10.415	2000	0
3		4000	20.83	0	10.415	2000	0
4	1	6000	20.83	0	10.415	2000	0
5		8000	20.83	0	10.415	2000	0
6		10000	20.83	0	10.415	2000	0
1		12000	20.85	0.01	10.42	2000	5E-06
2		14000	20.86	0.005	10.4275	2000	2.5E-06
3		16000	20.88	0.01	10.435	2000	5E-06
4	1.6	18000	20.89	0.005	10.4425	2000	2.5E-06
5		20000	20.89	0	10.445	2000	0
6		22000	20.9	0.005	10.4475	2000	2.5E-06
1		24000	20.92	0.01	10.455	2000	5E-06
2		26000	20.95	0.015	10.4675	2000	7.5E-06
3		28000	20.98	0.015	10.4825	2000	7.5E-06
4	2.2	30000	21.00	0.01	10.495	2000	5E-06
5		32000	21.02	0.01	10.505	2000	5E-06
6		34000	21.04	0.01	10.515	2000	5E-06

Tabel (6.4) Perhitungan laju penjaran retak pada spesimen IV

6.2.2. Penentuan Faktor Intensitas Tegangan

Penentuan faktor intensitas tegangan untuk bentuk spesimen M(T) yang diformulasikan berlaku pada spesimen untuk setiap laju penjararan retak yang diperoleh dihitung dengan persamaan berikut :

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W}} \sec \frac{\pi \alpha}{2}$$

- dimana : $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ untuk $R > 0$
- $\Delta P = P_{max}$ untuk $R < 0$
- $\alpha = 2a/W$ untuk $2a/W < 0.95$
- B = ketebalan spesimen
- a = panjang retak
- W = lebar spesimen

Dengan persamaan tersebut hasil perhitungan ΔK untuk setiap pengukuran dapat ditabulasikan sebagai berikut :

No.	f (Hz)	N (cycle)	2a (mm)	a (m)	K min (Pa.m ^{0.5})	K max (Pa.m ^{0.5})	delta K (MPa.m ^{0.5})
1		0	20.51				
2		2000	20.89	0.01035	688567.449	9836677.9	9.143110451
3		4000	21.24	0.010533	697684.1112	9966915.933	9.269231822
4	2.2	6000	21.63	0.010718	707016.775	10100239.7	9.393222928
5		8000	22.06	0.010923	717472.2631	10249603.82	9.532131556
6		10000	22.44	0.011125	727925.1809	10398931.22	9.671006036
1		12000	22.57	0.011253	734573.8415	10493912.08	9.759338242
2		14000	22.68	0.011313	737721.2853	10538875.57	9.801154281
3		16000	22.8	0.01137	740749.0607	10582129.5	9.841380439
4	1.6	18000	22.93	0.011433	744053.0799	10629329.78	9.885276696
5		20000	23.08	0.011503	747769.8989	10682427.19	9.934657291
6		22000	23.25	0.011583	752039.2299	10743417.63	9.991378403
1		24000	23.30	0.011638	754987.979	10785542.62	10.03055464
2		26000	23.32	0.011655	755928.5716	10798979.66	10.04305109
3		28000	23.38	0.011675	757004.9382	10814356.32	10.05735139

4	1	30000	23.43	0.011703	758487.4016	10835534.37	10.07704697
5		32000	23.47	0.011725	759702.458	10852892.32	10.09318986
6		34000	23.53	0.01175	761054.7864	10872211.3	10.11115951

Tabel (6.5) Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen I

No.	f (Hz)	N (cycle)	2a (mm)	a (m)	K min (Pa.m ^{0.5})	K max (Pa.m ^{0.5})	delta K (MPa.m ^{0.5})
1		0	23.53				
2		2000	23.61	0.011785	762952.0835	10899315.54	10.13636346
3		4000	23.71	0.01183	765398.4531	10934263.68	10.16886523
4	1	6000	23.79	0.011875	767852.774	10969325.41	10.20147263
5		8000	23.88	0.011918	770178.133	11002544.82	10.23236669
6		10000	23.96	0.01196	772510.755	11035867.99	10.26335724
1		12000	24.1	0.012015	775540.3607	11079148.07	10.30360771
2		14000	24.24	0.012085	779414.3082	11134490.18	10.35507587
3		16000	24.37	0.012153	783169.4176	11188134.6	10.40496518
4	1.6	18000	24.52	0.012223	787084.2225	11244060.39	10.45697617
5		20000	24.72	0.01231	792007.8444	11314397.84	10.52239
6		22000	24.94	0.012415	797961.3964	11399448.59	10.60148719
1		24000	25.35	0.012573	806987.0817	11528386.95	10.72139987
2		26000	25.7	0.012763	818033.6418	11686194.95	10.86616131
3		28000	26.09	0.012943	828963.8562	11842340.87	11.01337702
4	2.2	30000	26.49	0.013145	840832.0863	12011887.02	11.17105493
5		32000	26.91	0.01335	853380.2138	12191145.93	11.33773577
6		34000	27.34	0.013563	866647.2539	12380675.13	11.51402787

Tabel (6.6) Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen II

No.	f (Hz)	N (cycle)	2a (mm)	a (m)	K min (Pa.m ^{0.5})	K max (Pa.m ^{0.5})	delta K (MPa.m ^{0.5})
1		0	20.39				
2		2000	20.44	0.010208	905564.9433	12936642.05	12.0310771
3		4000	20.48	0.01023	907041.7418	12957739.17	12.05069743
4	2.2	6000	20.53	0.010253	908520.1682	12978859.55	12.07033938
5		8000	20.59	0.01028	910329.3631	13004705.19	12.09437582
6		10000	20.64	0.010308	912141.0324	13030586.18	12.11844514
1		12000	20.68	0.01033	913625.164	13051788.06	12.13816289
2		14000	20.71	0.010348	914780.6529	13068295.04	12.15351439
3		16000	20.73	0.01036	915606.6295	13080094.71	12.16448808
4	1.6	18000	20.76	0.010373	916433.1314	13091901.88	12.17546875
5		20000	20.79	0.010388	917425.6304	13106080.43	12.1886548
6		22000	20.83	0.010405	918584.5111	13122635.87	12.20405136
1		24000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563

2		26000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
3		28000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
4	1	30000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
5		32000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
6		34000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563

Tabel (6.7) Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen III

No.	f (Hz)	N (cycle)	2a (mm)	a (m)	K min (Pa.m ^{0.5})	K max (Pa.m ^{0.5})	delta K (MPa.m ^{0.5})
1		0	20.83				
2		2000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
3		4000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
4	1	6000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
5		8000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
6		10000	20.83	0.010415	919247.1977	13132102.82	12.21285563
1		12000	20.85	0.01042	919578.6693	13136838.13	12.21725946
2		14000	20.86	0.010428	920076.0376	13143943.39	12.22386736
3		16000	20.88	0.010435	920573.5994	13151051.42	12.23047782
4	1.6	18000	20.89	0.010443	921071.3551	13158162.22	12.23709086
5		20000	20.89	0.010445	921237.3168	13160533.1	12.23929578
6		22000	20.9	0.010448	921403.3002	13162904.29	12.24150099
1		24000	20.92	0.010455	921901.3802	13170019.72	12.24811834
2		26000	20.95	0.010468	922731.9477	13181884.97	12.25915302
3		28000	20.98	0.010483	923729.3477	13196133.54	12.27240419
4	2.2	30000	21.00	0.010495	924561.1161	13208015.94	12.28345483
5		32000	21.02	0.010505	925226.9264	13217527.52	12.29230059
6		34000	21.04	0.010515	925893.0896	9954373.266	9.028480197

Tabel (6.8) Perhitungan faktor intensitas tegangan spesimen IV

Dari hasil perhitungan harga laju penjalaran retak, da/dN dan rentang faktor intensitas tegangan, maka hubungan kedua variabel itu dapat dinyatakan dengan didasarkan pada persamaan Paris Erdogan dalam bentuk logaritma

sebagai berikut : $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$

$$\text{Log}\left(\frac{da}{dN}\right) = \text{Log}.C + m.\text{Log}.\Delta K$$

Bentuk penurunan persamaan Paris Erdogan dalam bentuk logaritma seperti diatas menunjukkan bentuk persamaan garis yang linear terhadap variabel bebas logaritma dari ΔK dimana gradien persamaan garis dari bentuk ditunjukkan oleh harga m dan konstanta persamaan garis ditunjuk oleh logaritma C. Analisa yang digunakan menentukan persamaan garis dengan menggunakan metoda statistik yaitu regresi linear. Harga laju penjalaran retak fatik dan rentang faktor intensitas tegangan dalm bentuk logaritma ditunjukkan dalam tabel berikut ini :

No.	f (Hz)	N (cycle)	da (mm)	dN (cycle)	da/dN (m/cycle)	delta K (MPa.m ^{0.5})	Log (da/dN)	Log (deltak)
1		0						
2		2000	0.19	2000	9.5E-08	9.148110451	-7.0222764	0.9613314
3		4000	0.175	2000	8.75E-08	9.269231822	-7.0579919	0.96704374
4	2.2	6000	0.195	2000	9.75E-08	9.393222928	-7.0109954	0.97281463
5		8000	0.215	2000	1.075E-07	9.532131555	-6.9685915	0.97919003
6		10000	0.19	2000	9.5E-08	9.671006036	-7.0222764	0.98547165
1		12000	0.065	2000	3.25E-08	9.759338242	-7.4881166	0.98942037
2		14000	0.055	2000	2.75E-08	9.801154281	-7.5606673	0.99127723
3		16000	0.06	2000	3E-08	9.841380439	-7.5228787	0.99305602
4	1.6	18000	0.065	2000	3.25E-08	9.885276696	-7.4881166	0.99498883
5		20000	0.075	2000	3.75E-08	9.934657291	-7.4259687	0.99715289
6		22000	0.085	2000	4.25E-08	9.991378403	-7.3716111	0.99962541
1		24000	0.025	2000	1.25E-08	10.03055464	-7.90309	1.00132495
2		26000	0.01	2000	5E-09	10.04305109	-8.30103	1.00186567
3		28000	0.03	2000	1.5E-08	10.05735139	-7.8239087	1.00248362
4	1	30000	0.025	2000	1.25E-08	10.07704697	-7.90309	1.00333328
5		32000	0.02	2000	1E-08	10.09318986	-8	1.00402844
6		34000	0.03	2000	1.5E-08	10.11115651	-7.8239087	1.00480083

Tabel (6.9) Harga laju penjalaran retak dalam bentuk logaritma spesimen I

No.	f (Hz)	N	da (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)	delta K (MPa.m ^{0.5})	Log (da/dN)	Log (deltak)
1		0						
2		2000	0.03	2000	1.5E-08	10.13636346	-7.8239087	1.00588217

3		4000	0.05	2000	2.5E-08	10.16886523	-7.60206	1.00727249
4	1	6000	0.05	2000	2.5E-08	10.20147263	-7.60206	1.00866287
5		8000	0.045	2000	2.25E-08	10.23236669	-7.6478175	1.0099761
6		10000	0.05	2000	2.5E-08	10.26335724	-7.60206	1.01128945
1		12000	0.06	2000	3E-08	10.30360771	-7.5228787	1.01298932
2		14000	0.07	2000	3.5E-08	10.35507587	-7.455932	1.01515329
3		16000	0.065	2000	3.25E-08	10.40496518	-7.4881166	1.01724063
4	1.6	18000	0.075	2000	3.75E-08	10.45697617	-7.4259687	1.01940612
5		20000	0.1	2000	5E-08	10.52239	-7.30103	1.02211439
6		22000	0.11	2000	5.5E-08	10.60148719	-7.2596373	1.02536679
1		24000	0.205	2000	1.025E-07	10.72139987	-6.9892761	1.03025149
2		26000	0.175	2000	8.75E-08	10.86816131	-7.0579919	1.03615608
3		28000	0.195	2000	9.75E-08	11.01337702	-7.0109954	1.04192051
4	2.2	30000	0.2	2000	1E-07	11.17105493	-7	1.04809419
5		32000	0.21	2000	1.05E-07	11.33776577	-6.9788107	1.05452748
6		34000	0.215	2000	1.075E-07	11.51402787	-6.9685915	1.06122728

Tabel (6.10) Harga laju penjalaran retak dalam bentuk logaritma spesimen II

No.	f (Hz)	N (cycle)	da (mm)	dN (cycle)	da/dN (m/cycle)	delta K (MPa.m ^{0.5})	Log (da/dN)	Log (deltaK)
1		0						
2		2000	0.025	2000	1.25E-08	12.0310771	-7.90309	1.03030451
3		4000	0.02	2000	1E-08	12.05069743	-8	1.08101218
4	2.2	6000	0.025	2000	1.25E-08	12.07033933	-7.90309	1.08171948
5		8000	0.03	2000	1.5E-08	12.09437582	-7.8239087	1.08258346
6		10000	0.025	2000	1.25E-08	12.11844514	-7.90309	1.0834469
1		12000	0.02	2000	1E-08	12.13816289	-8	1.08415296
2		14000	0.015	2000	7.5E-09	12.15351439	-8.1249387	1.08470183
3		16000	0.01	2000	5E-09	12.16448803	-8.30103	1.08509384
4	1.6	18000	0.015	2000	7.5E-09	12.17546875	-8.1249387	1.08548569
5		20000	0.015	2000	7.5E-09	12.1866548	-8.1249387	1.08595578
6		22000	0.02	2000	1E-08	12.20405136	-8	1.08650403
1		24000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
2		26000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
3		28000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
4	1	30000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
5		32000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
6		34000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722

Tabel (6.11) Harga laju penjalaran retak dalam bentuk logaritma spesimen III

No.	f (Hz)	N	da (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)	delta K (MPa.m ^{0.5})	Log (da/dN)	Log (deltaK)
1		0						
2		2000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
3		4000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
4	1	6000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
5		8000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
6		10000	0	2000	0	12.21285563		1.08681722
1		12000	0.005	2000	2.5E-09	12.21725946	-8.60206	1.0869738
2		14000	0.01	2000	5E-09	12.22366736	-8.30103	1.08720863
3		16000	0.01	2000	5E-09	12.23047782	-8.30103	1.08744342
4	1.6	18000	0.005	2000	2.5E-09	12.23709086	-8.60206	1.08767818
5		20000	0	2000	0	12.23929578		1.08775643
6		22000	0.0075	2000	3.75E-09	12.24150099	-8.4259687	1.08783467
1		24000	0.0075	2000	3.75E-09	12.24811834	-8.4259687	1.08806937
2		26000	0.015	2000	7.5E-09	12.25915302	-8.1249387	1.08846047
3		28000	0.015	2000	7.5E-09	12.27240419	-8.1249387	1.08892965
4	2.2	30000	0.01	2000	5E-09	12.28345483	-8.30103	1.08932053
5		32000	0.01	2000	5E-09	12.29230059	-8.30103	1.08963317
6		34000	0.01	2000	5E-09	12.30115105	-8.30103	1.08994575

Tabel (6.12) Harga laju penjaran retak dalam bentuk logaritma spesimen IV

Dengan berdasarkan data perhitungan laju penjaran retak dan rentang faktor intensitas tegangan dalam bentuk logaritma dapat disusun bentuk diagram persamaan garis yang menyatakan hubungan antara kedua data itu dalam perbedaan frekuensi beban untuk spesimen I, II, III dan IV. Pada penggambaran diagram garis tidak seluruh data dapat dipakai, sebagai acuan beberapa penelitian memberikan batasan gradien garis m pada tahap II yaitu harganya $2 < m < 5$ untuk laju penjaran retak sekitar $10^{-8} m/cycle$ sampai $10^{-6} m/cycle$. Dengan pertimbangan ini maka dapat ditentukan data-data yang tidak valid sebagai akibat kesalahan saat pengukuran atau keadaan beban mesin yang kurang stabil. Dalam keadaan yang demikian perlu dilakukan

pertimbangan secara teknis tanpa mengurangi atau menghilangkan data hasil perhitungan pengujian.

6.3. Analisa Diagram Hasil Perhitungan

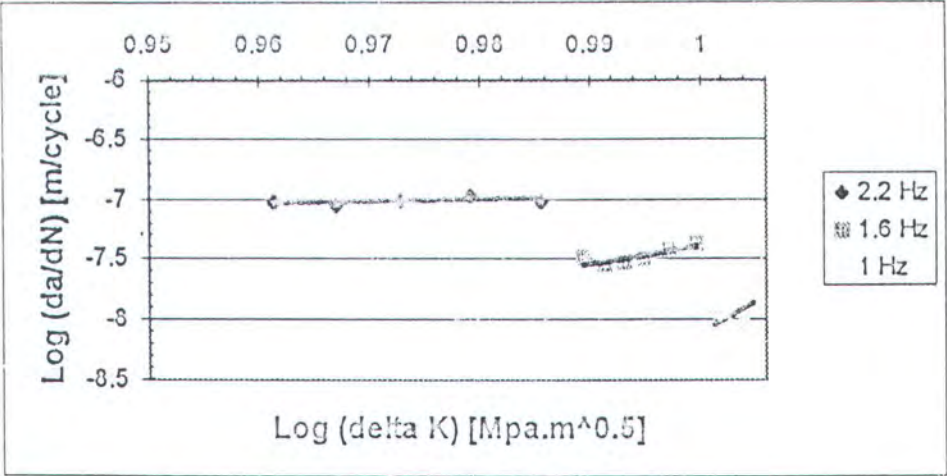
Pada analisis bentuk diagram hubungan laju penjaralan retak ini ditampilkan dalam masing-masing spesimen dengan urutan frekuensi pembebanan yang berbeda seperti dalam gambar (6.1), (6.2), (6.3), (6.4), (6.5), dan (6.6). Harga persamaan garis yang ditunjukkan garis-garis pada gambar tersebut adalah sebagai berikut :

- spesimen I dengan frekuensi 2.2 Hz adalah : $y = -7.205847 x - 0.00326$
spesimen I dengan frekuensi 1.6 Hz adalah : $y = 14.88467 x - 22.2754$
spesimen I dengan frekuensi 1 Hz adalah : $y = 50.67959 x - 58.7894$
- spesimen II dengan frekuensi 1 Hz adalah : $y = 27.58937 x - 19.7194$
spesimen II dengan frekuensi 1.6 Hz adalah : $y = 18.29382 x - 26.037$
spesimen II dengan frekuensi 2.2 Hz adalah : $y = 1.649735 x - 8.72552$
- spesimen III dengan frekuensi 2.2 Hz adalah : $y = -7.309454 x - 3.7E-05$
spesimen III dengan frekuensi 1.6 Hz adalah : $y = 11.6474 x - 20.7537$
spesimen III dengan frekuensi 1 Hz adalah : $y = -$
- spesimen IV dengan frekuensi 1 Hz adalah : $y = -$
spesimen IV dengan frekuensi 1.6 Hz adalah : $y = 21.58547 x - 31.9191$
spesimen IV dengan frekuensi 2.2 Hz adalah : $y = -1.85815 x - 6.23952$

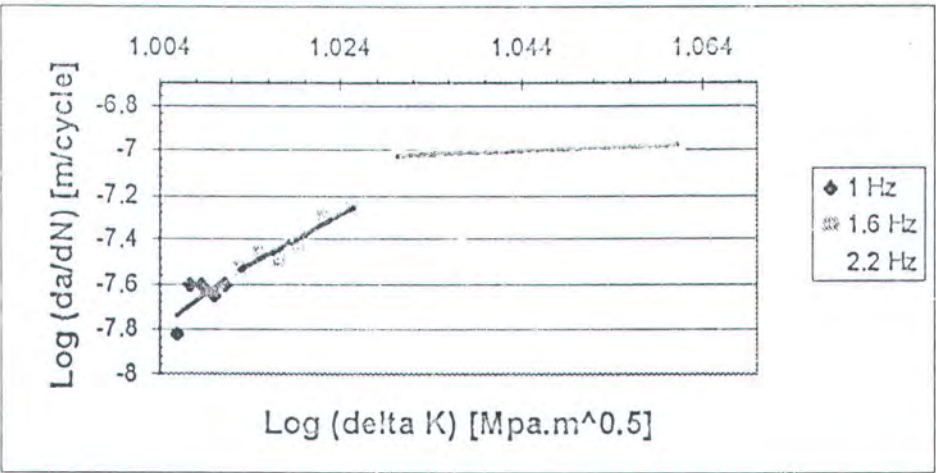
Maka harga konstanta eksponen m dan harga konstanta C dapat ditentukan sebagai berikut :

- spesimen I dengan frekuensi 2.2 Hz harga $m = -0.00326$, $C = 6.22519E-08$
spesimen I dengan frekuensi 1.6 Hz harga $m = -22.2754$, $C = 7.66778E14$
spesimen I dengan frekuensi 1 Hz harga $m = -58.7894$, $C = 4.78178E50$
- spesimen II dengan frekuensi 1 Hz harga $m = -19.7194$, $C = 3.88481E27$
spesimen II dengan frekuensi 1.6 Hz harga $m = -26.037$, $C = 1.9807E18$
spesimen II dengan frekuensi 2.2 Hz harga $m = -8.72552$, $C = 44.641112$
- spesimen III dengan frekuensi 2.2 Hz harga $m = -3.7E-05$, $C = 4.904E-08$
spesimen III dengan frekuensi 1.6 Hz harga $m = -20.7537$, $C = 4.44E-11$
spesimen III dengan frekuensi 1 Hz harga $m = -$, $C = -$
- spesimen IV dengan frekuensi 1 Hz harga $m = -$, $C = -$
spesimen IV dengan frekuensi 1.6 Hz harga $m = -31.9191$, $C = 3.85E-21$
spesimen IV dengan frekuensi 2.2 Hz harga $m = -6.23952$, $C = 0.0138627$

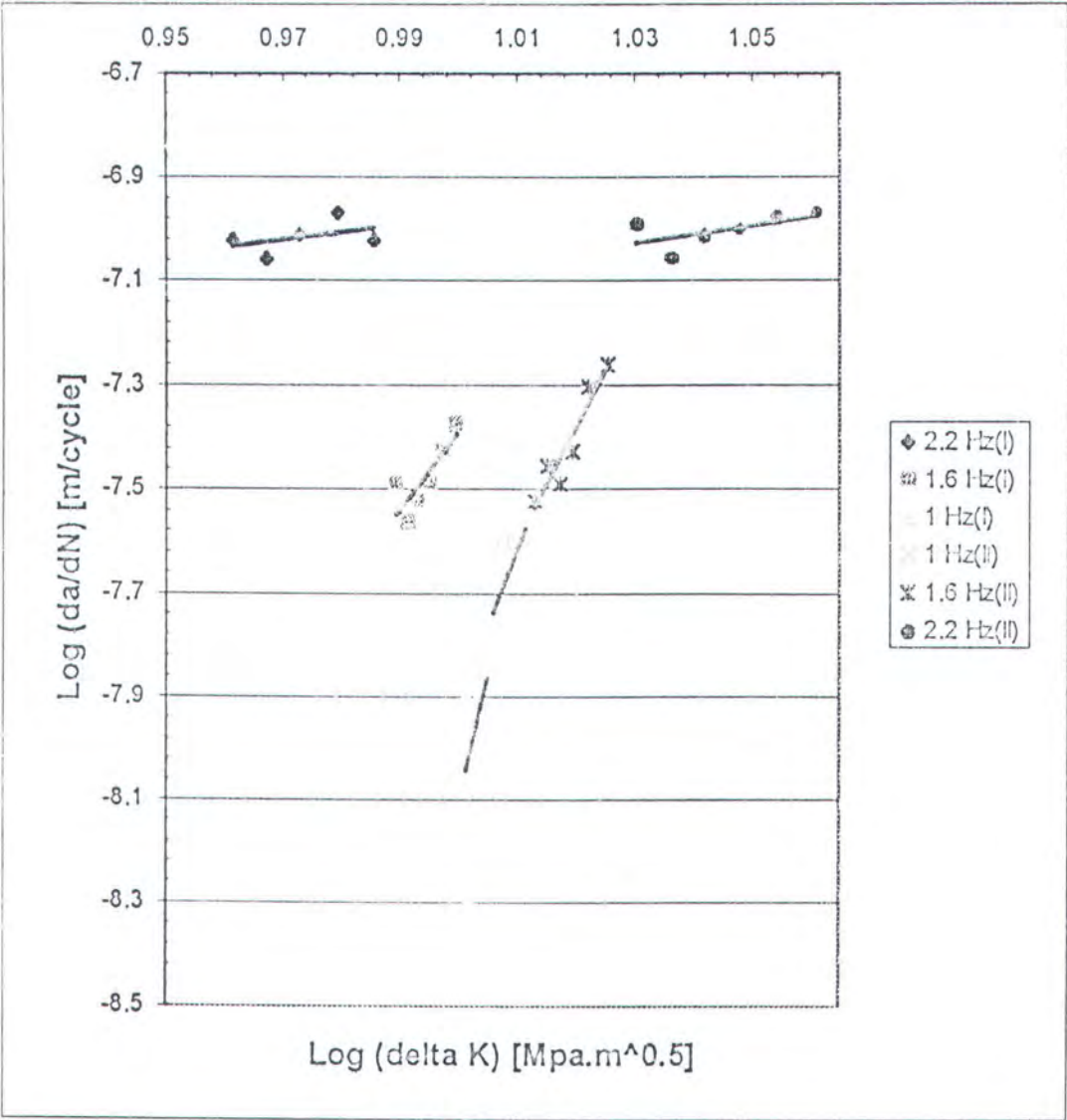
Keempat diagram yang ditunjukkan pada gambar (6.1), (6.2), (6.3) dan (6.4) menyatakan bahwa untuk perubahan frekuensi pembebanan menunjukkan perubahan diagram garis. Pada keempat diagram tersebut juga menunjukkan untuk semakin tinggi harga frekuensi beban maka kecenderungan laju penjalaran retak yang dinyatakan dalam fungsi faktor intensitas tegangan ternyata ikut menjadi tinggi tetapi dengan adanya penegar maka laju penjalaran retak dapat diperlambat. Untuk frekuensi pembebanan yang tinggi menunjukkan penurunan kekuatan sisa yang lebih cepat.



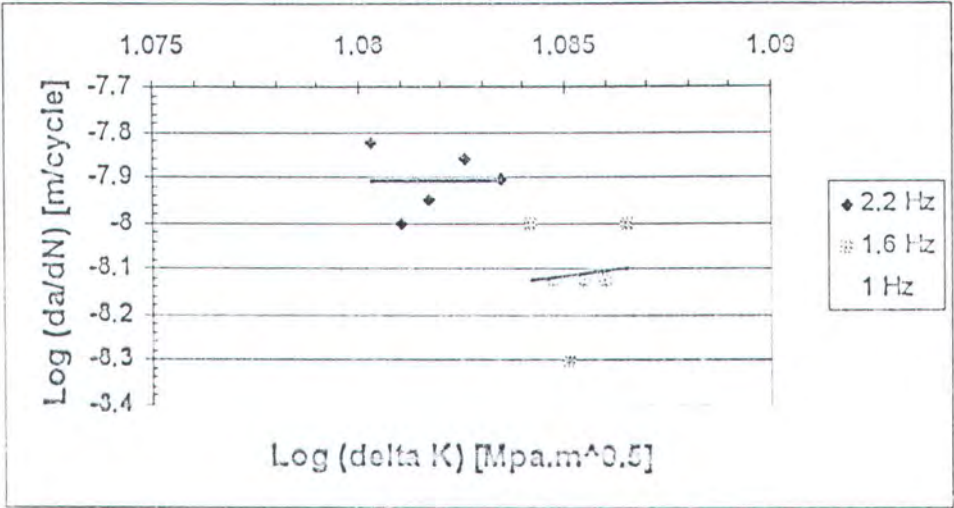
Gambar (6.1) Hubungan log da/dN dengan log ΔK spesimen I



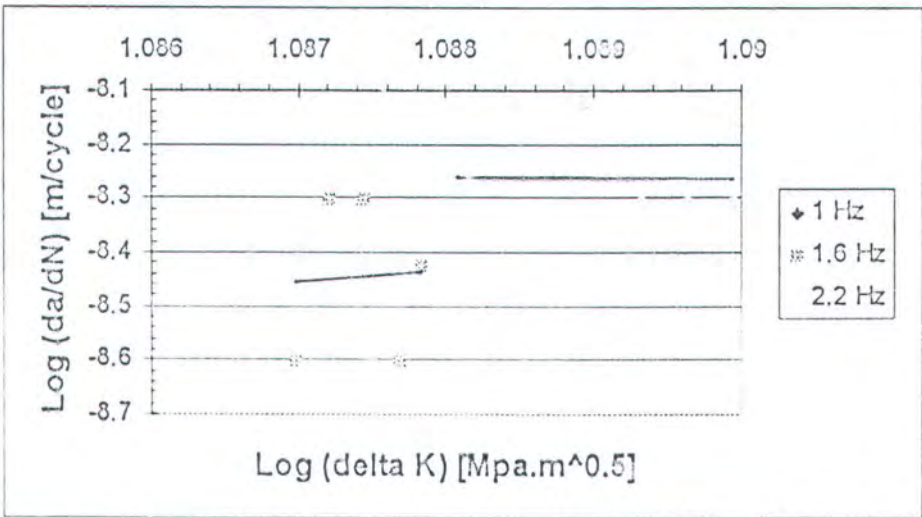
Gambar (6.2) Hubungan log da/dN dengan log ΔK spesimen II



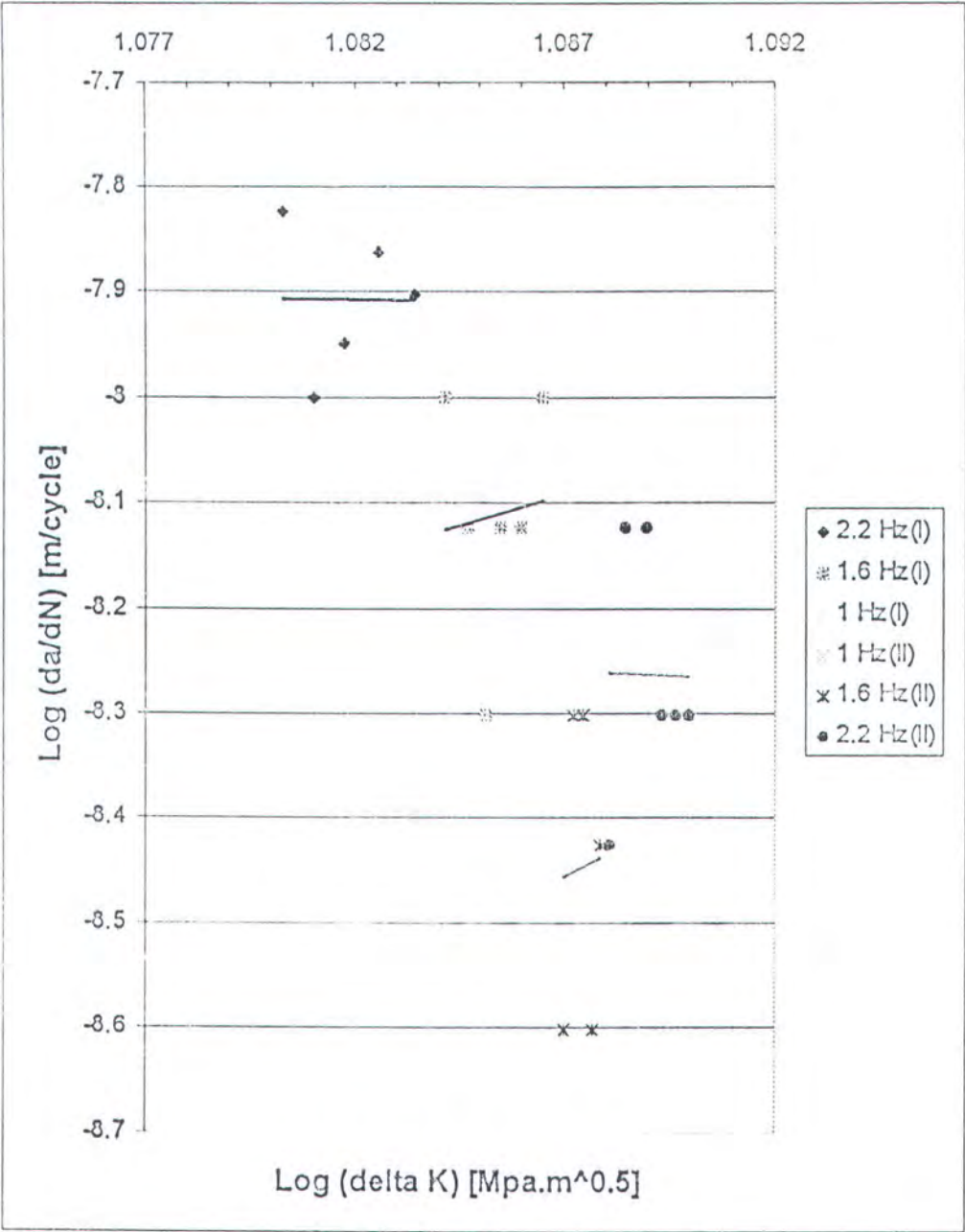
Gambar (6.3) Hubungan $\log da/dN$ dengan $\log \Delta K$ spesimen I dan II



Gambar (6.4) Hubungan log da/dN dengan log ΔK spesimen III



Gambar (6.5) Hubungan log da/dN dengan log ΔK spesimen IV



Gambar (6.6) Hubungan log da/dN dengan log ΔK spesimen III dan IV

Dari analisis secara dengan perhitungan maupun pengamatan kepecahan spesimen tentunya akan timbul pertanyaan mengapa frekuensi beban yang tinggi dapat mempengaruhi laju penjalaran retak (menaikkan laju penjalaran retaknya). Untuk menjawab pernyataan itu, perlu ditinjau keterkaitan permasalahan beban dinamis dengan dengan teori getaran yang dibahas dalam Bab IV. Pada permasalahan ini perlu diketahui frekuensi natural spesimen yang digunakan dalam pengujian. Dengan diketahui frekuensi natural dari spesimen tentunya akan diketahui kedudukan frekuensi beban yang akan digunakan dalam pengujian dalam hal ini digunakan perhitungan pendekatan frekuensi natural secara sederhana. Untuk itu sistem dianggap mempunyai satu derajat kebebasan, dimana harga frekuensi natural dinyatakan sebagai fungsi k dan m dalam hal ini perhitungan dengan bantuan Software MSC/NASTRAN. Maka diketahui untuk spesimen tanpa penegar $f_n = 4.465865$ Hz, spesimen dengan penegar $f_n = 4.623335$ Hz.

Dari sini dapat ditunjukkan bahwa harga frekuensi beban yang dipakai dalam pengujian semakin mendekati harga frekuensi natural spesimen. Didasarkan pada teori getaran paksa pada Bab IV pada diagram yang menyatakan hubungan *magnificant factor* dengan *tuning factor* menunjukkan bahwa untuk harga frekuensi eksitasi yang mendekati harga frekuensi natural maka harga amplitudo responnya (displacement bukaan retak) akan semakin besar. Bertambah besarnya amplitudo respon pada permasalahan ini akan mempengaruhi laju penjalaran retak

Uraian diatas setidaknya dapat menjawab pernyataan diatas, akan tetapi masih perlu dilakukan pengujian yang lebih lanjut untuk frekuensi-frekuensi eksitasi yang berada diatas frekuensi natural mempunyai perilaku yang demikian. Dalam hal ini uraian ini hanya dapat membuktikan sebagian dari permasalahan.

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Dari hasil analisis perhitungan dan pengamatan pengujian terhadap hubungan kecepatan penjalaran retak dengan frekuensi pembebanan, maka dapat disimpulkan secara objektif sebagai berikut :

- Dengan didasarkan pada hasil perhitungan dan analisis diagram dapat dinyatakan bahwa frekuensi beban mempengaruhi kecepatan penjalaran retak dan hasil perhitungan pengujian dapat dinyatakan bahwa semakin besar frekuensi beban (menuju frekuensi natural) maka semakin besar harga laju penjalaran retak.
- Berdasarkan analisis diagram garis yang ditunjukkan pada hubungan antara laju penjalaran retak dengan rentang faktor intensitas tegangan maka dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan Paris-Erdogan dengan beberapa parameternya dipengaruhi frekuensi bentuk sebagai berikut :

$$\frac{da}{dN} = C(f) \cdot (\Delta K)^{m(f)}$$

persamaan tersebut menunjukkan bahwa harga C dan m dapat dipengaruhi oleh frekuensi beban. Secara umum mekanisme penjalaran retak tersusun dalam formasi striation selama dalam tahap II.

- Dari hasil analisis kepecahan menunjukkan bahwa frekuensi yang besar (menuju frekuensi alami) maka penalaran retak material mempunyai kecenderungan bersifat brittle dan dari hasil ini pula dapat dikatakan bahwa semakin besar frekuensi akan mengakibatkan spasi striationnya mempunyai harga yang besar, tetapi dengan adanya penambahan penegar arah melintang retak maka material akan bersifat ductile sehingga akan menghambat lajunya penalaran retak.
- Kondisi keseimbangan antara energi tahanan retak dengan energi pengendali retak dapat terjadi dengan pemasangan penegar yang terletak melintang tersebut. Hal ini ditunjukkan dengan terjadinya penghambatan laju penalaran retak. Namun muncul cabang retak (branching crack) dimana fenomena ini dapat dijelaskan dengan teori energi sisa yang terkonversi menjadi energi kinetis.

Dengan demikian secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa kecepatan penalaran retak dapat dihambat dengan adanya penambahan penegar arah melintang perambatan retak.

7.2. Saran

Dengan mengacu pada analisa hasil pengujian dan hambatan yang dijumpai selama pengujian, maka dapat disarankan :

-
- Perlu dilakukan penelitian yang dapat menentukan parameter-parameter yang dapat menghubungkan secara matematis antara laju penjararan retak dengan frekuensi pembebanan.
 - Pemilihan frekuensi beban dengan memperhatikan frekuensi natural spesimen, apakah besarnya jauh dari frekuensi natural atau mendekati dari frekuensi natural yang akan mempunyai pengaruh berbeda terhadap laju penjararan retak.
 - Pengujian kelelahan dengan variasi jarak penegar melintang arah penjararan retak dengan memperhatikan adanya tegangan sisa dan deformasi yang menimbulkan momen banding pada spesimen.

DAFTAR PUSTAKA

1. Annual Book of American Society for Testing Materials 1994 Vol.03.01, **Metal Test Methods and Analytical Procedures**, Philadelphia, 1994.
2. Ardi, Farhad, **Studi Pengaruh Penggunaan Pengelasan sebagai Metode Penahanan Retak Pada Material Getas** , Tugas Akhir Teknik Perkapalan FTK- ITS , Surabaya , 1996.
3. Wiyono, Hadi, **Analisa Kecepatan Penjalaran Retak da/dN akibat Frekuensi Pembebanan Yang Berubah**, Tugas Akhir Teknik Perkapalan FTK-ITS, Surabaya, 1994.
4. Broek, David, **Elementary Engineering Fracture Mechanics**, Martinus Nijhof, Boston, 1982
5. Broek, David, **Practical Use of Fracture Mechanics**
6. Dieter, E. George, **Mechanical Metalurgy**, Mc.Graw-Hill Inc, UK, 1988.
7. Fuch, H.O., and Stephen, R.I., **Metal Fatigue in Engineering**, Toronto, A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, 1980.
8. Dimarogonas, Andrew D., and Haddad, Sam., **Vibration For Engineers**, Prentice-Hall Inc., Eaglewood Cliffs, New Jersey 1992.
9. Meirovitch, Leonard., **Elements of Vibration Analysis**, Kogakusha International Student Edition Mc Graw-Hill, 1975.

LANGKAH KERJA PENGUJIAN

A. Pengujian Tarik

Persiapan Material

- Pemeriksaan ulang keadaan fisik material (untuk mengetahui kemungkinan terjadinya cacat pada material).
- Pemeriksaan ulang dimensi material lebar (W), tebal (B), dan panjang (L).

Persiapan Peralatan

- Pemeriksaan keadaan mesin uji statis (sesuai dengan petunjuk pengoperasian).
- Pemilihan klem penjepit sesuai dengan ketebalan dari material yang akan diuji.
- Pemasangan kertas grafik (kertas milimeter) pada drum penggambar.
- Pemasangan pena penggambar grafik pengujian.
- Penentuan sumbu absis untuk permulaan grafik hasil pengujian.
- Pemilihan skala beban.
- Pemilihan besar skala beban ini dimaksudkan agar besarnya pembebanan yang dikenakan pada material tidak berlebihan atau kekurangan sehingga material dapat putus pada rentang beban yang diperkirakan. Material yang diuji adalah mild steel SS-41 dan beban yang dipakai 100 kN.

Pelaksanaan Pengujian

- Material yang akan diuji dipasang pada klem penjepit atas dan klem penjepit bawah, kemudian diatur agar bagian material yang tak terjepit sepanjang gage length.
- Saklar power mesin dihidupkan.
- Kecepatan pembebanan diatur disesuaikan dengan keadaan material.
- Dilakukan pengamatan terhadap beban yang ditunjukkan oleh jarum penunjuk. Apabila material mencapai keadaan yield ditunjukkan dengan ketidakteraturan dari kenaikan jarum penunjuk. Dan titik ultimate yang dapat ditunjukkan pada skala maksimum yang dapat dicapai.
- Dilakukan pencatatan terhadap beban maksimum yang ditunjuk.
- Melepas benda uji dari klem penjepit, kemudian dilakukan pengukuran terhadap dimensi panjang (gage length), tebal dan lebar
- Dari grafik yang dihasilkan dapat diketahui titik luluh (yield point), kekuatan tarik (tensile strength), perpanjangan (elongation) dan kekuatan luluh (yield strength).

B. Kalibrasi Beban

Tujuan kalibrasi ini adalah untuk mendapatkan kesetaraan beban yang ditunjukkan pada mesin uji statis-dinamis dengan mesin uji tarik statis.

Langkah kerja :

- Pemasangan penahan tambahan pada load cell besar untuk pemasangan pada klem penjepit pada mesin uji tarik.
- Menghidupkan saklar pada mesin uji tarik.
- Pemasangan load cell besar pada klem mesin uji tarik. Untuk mendapatkan posisi yang tepat dilakukan pengaturan klem bawah dan atas.
- Dilakukan pemasangan kabel yang menghubungkan antara load cell dengan salah satu kanal pada amplifier strain pada mesin uji statis dinamis.
- Menghidupkan saklar power amplifier dan dilakukan pengaturan agar angka yang ditunjukkan sebelum dibebani sama dengan nol.
- Pembebanan dilakukan dengan kenaikan beban secara bertahap dan pembacaan strain indikator dilakukan setiap kenaikan beban 1kN sampai 50kN.
- Hasil dari hubungan data yang menunjukkan hubungan antara beban dengan strain indikator diolah dengan regresi linier sehingga didapatkan persamaan garis yang menunjukkan hubungan keduanya.

C. Pengujian Dinamis

Persiapan Material

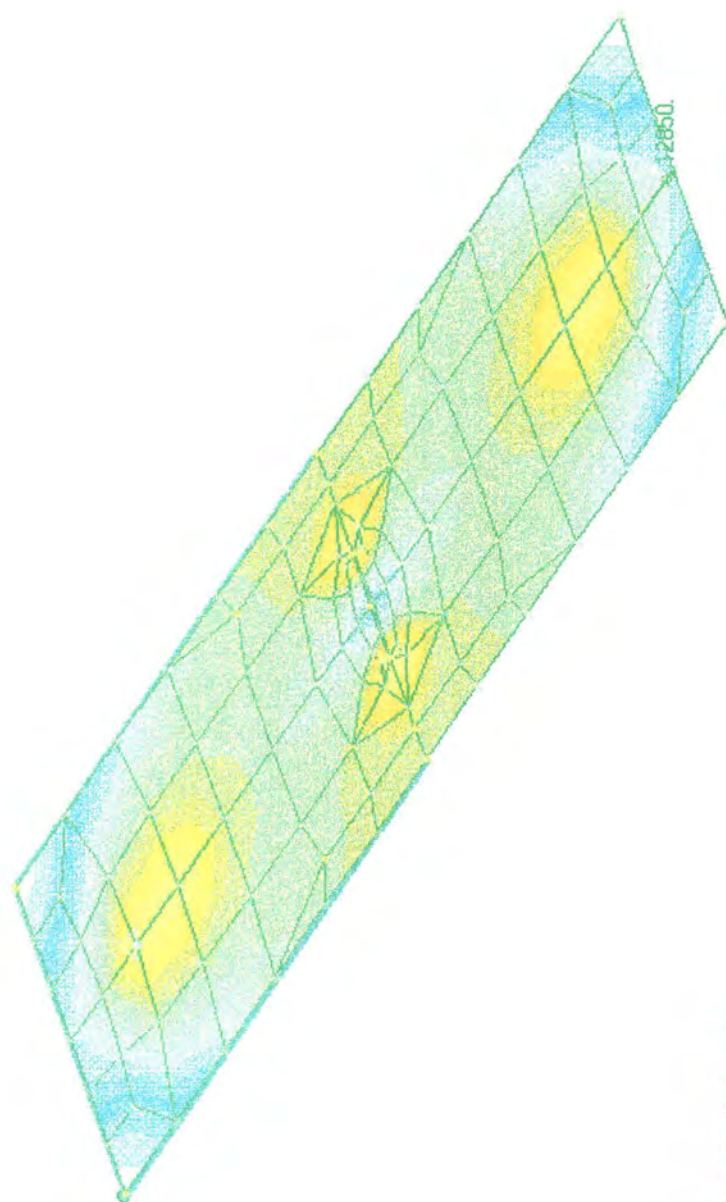
- Pemeriksaan ulang terhadap keadaan fisik material (adanya korosi atau tidak mengkilapnya pada permukaan yang akan terjadi penjararan retak).
- Pemeriksaan ulang terhadap dimensi dari material (lebar, tebal dan ukuran retak awal).

Persiapan Material

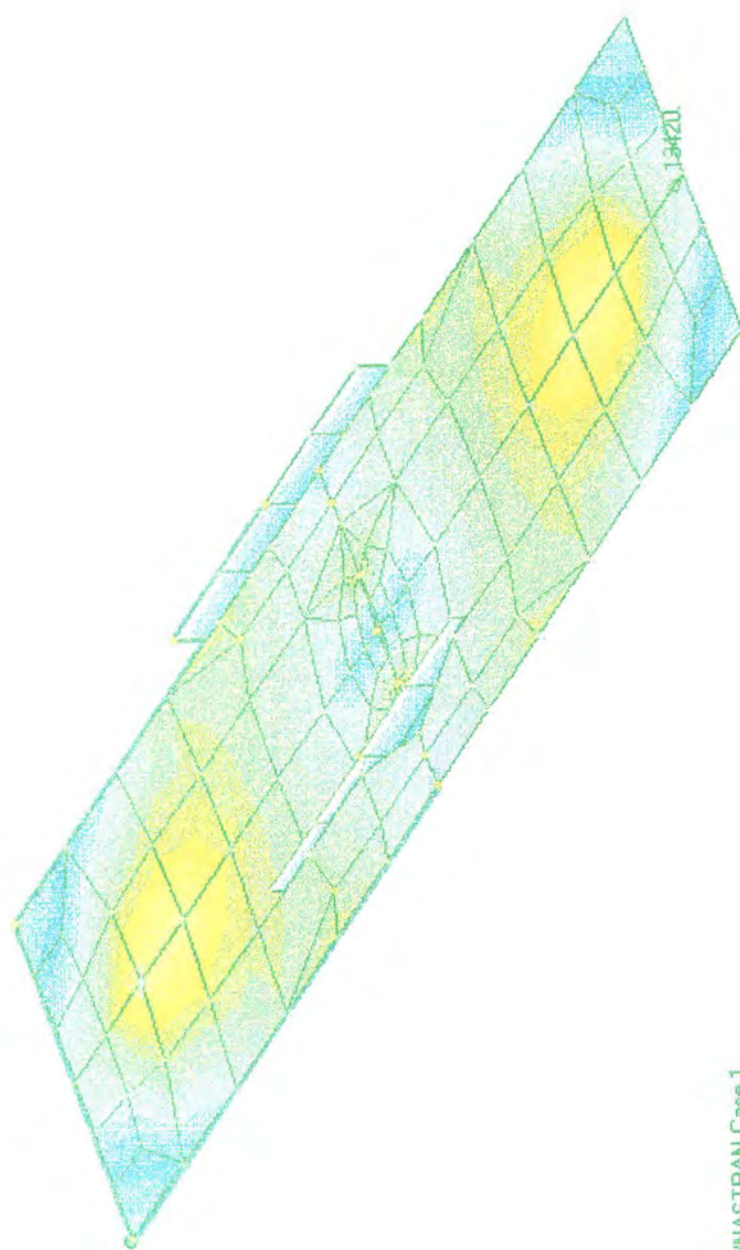
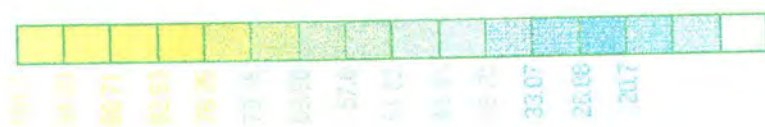
1. Pemeriksaan mesin uji statis dinamis (sesuai penunjuk pengoperasian).
2. Mikroskop diatur fokusnya pada kedudukan ujung retak dan dicatat kedudukan awalnya.
3. Frekuensi beban diatur sesuai dengan urutan yang dinyatakan dalam prosedur dengan mengatur potensiometer r_1, r_2 dan r_3 pada blok (SG2) sampai digit frekuensi yang kita inginkan.
4. Selanjutnya mengatur harga beban yang akan dipakai untuk mengatur harga maksimum dan minimum beban yang digunakan potensiometer r_1, r_2 dan r_3 pada blok (R1) dan untuk mengatur kedudukan rentang beban digunakan potensiometer r_1 pada blok (AM).
5. Setelah beban sesuai yang kita inginkan dihidupkan saklar penghitung siklus beban pada (MV2).
6. Dilakukan penentuan harga maksimum dan minimum beban dengan menggunakan saklar pada blok (R1), apabila harga maksimumnya kurang dari prosedur yang direncanakan maka dilakukan pengaturan beban lagi seperti pada langkah 4.
7. Pengukuran panjang retak dilakukan dengan penghentian pembebanan dengan memutar potensiometer r_1 pada blok (AM) ke kiri beban nol dan dilakukan juga pada potensiometer r_1, r_2 dan r_3 pada blok (R1). Penghentian beban ini dilakukan pada setiap 5000 cycle untuk frekuensi 2Hz, 4000 cycle untuk frekuensi 3Hz dan 1000 cycle untuk frekuensi 4Hz.

-
8. Untuk pergantian frekuensi beban dilakukan pada setiap 8 kali pengukuran panjang retak. Dan cara yang dilakukan sama dengan pada langkah 3 hingga 7.
9. Mesin dimatikan dengan prosedur sebagai berikut :
- Mematikan saklar counter pada posisi keatas.
 - Mengembalikan kedudukan potensio r1 pada blok (AM) kearah kiri sampai penuh.
 - Membuka katub pada peralatan hidrolis sampai menunjukan angka tekanan 0 bar.
 - Tekan tombol $b_{x/2}$ dan tombol $b_{1/1}$ warna merah.
 - Tekan tombol S1 dan S2 pada blok SG1 dan mematikan saklar dekat tombol $b_{1/1}$.
 - Kunci instrumen dimatikan S2 pada blok (NG) dan yang terakhir matikan handle pada panel box.

5 1 0



Output Set: MSC/NASTRAN Case 1
 Contour: Plate Top VonMises Stress



Output Set: MSC/NASTRAN Case 1
 Contour: Plate Top VonMises Stress

515

FORMULASI ELEMEN

C.1. Tinjauan Umum

Pengertian elemen isoparametris adalah parameter yang digunakan untuk menyatakan bentuk atau ekspresi geometris elemen sama jumlahnya dengan parameter yang digunakan untuk ekspresi model displasemennya.

Berbeda dengan sistem koordinat yang umum digunakan (misal cartesian) maka dalam formulasi elemen isoparametris sistem koordinat yang digunakan adalah koordinat natural yang mempunyai harga maksimum 1 dan harga minimum -1 . Dengan penggunaan elemen isoparametris shape function dapat langsung ditentukan tanpa mencari invers matriksnya tetapi didapat dari mapping antara sistem koordinat cartesian dengan sistem koordinat natural.

Elemen isoparametris berguna untuk memodelkan struktur yang tepinya lengkung dan membentuk jaring yang tidak lurus, efektif dalam masalah elastisitas dua dan tiga dimensi, analisis cangkang dan juga aplikasi non struktural.

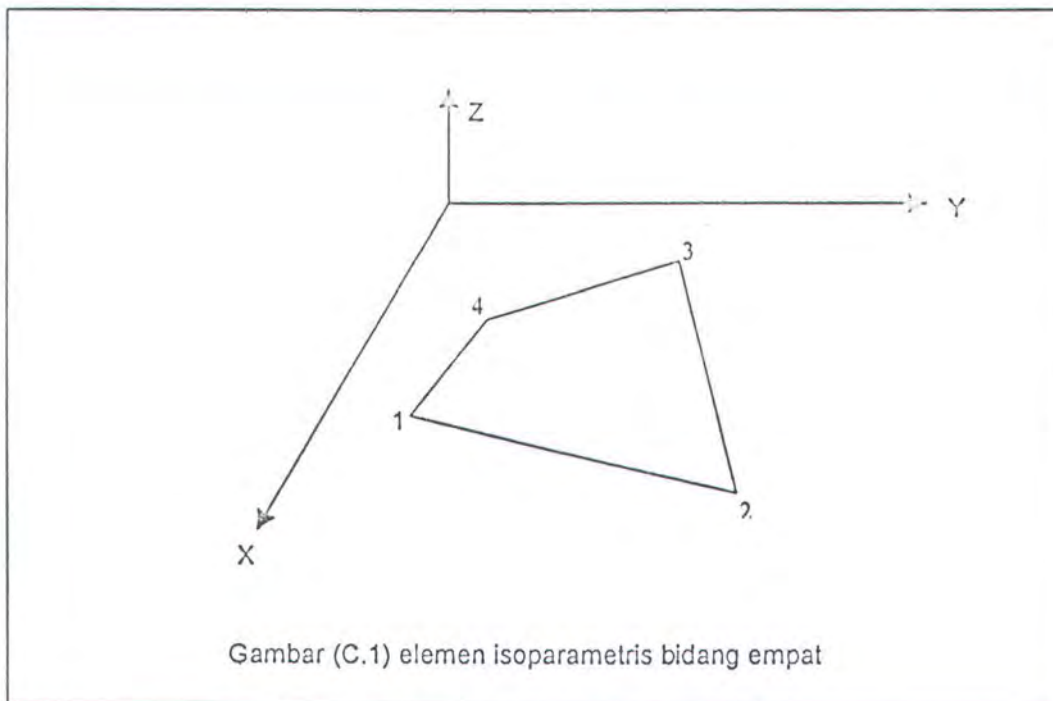
Koordinat natural yang digunakan adalah ξ dan η yang tidak harus saling tegak lurus dan tidak harus sejajar dengan sumbu x maupun y. Setiap titik dapat ditunjukkan dengan notasi (x,y) maupun (ξ, η) .

C.2. Struktur pelat

Elemen shell disini diharapkan dapat mewakili sifat serta kelakuan dari struktur pelat. Pada analisa ini menggunakan elemen isoparametris bidang segiempat dan elemen isoparametris bidang segitiga.

C.2.1. Elemen Bidang Segiempat (Plane Bilinear Isoparametric Element)

Untuk elemen isoparametris linear bidang empat simpul dengan dua sistem koordinat dapat dilihat pada gambar C.1



Pada elemen tersebut parameter yang digunakan untuk geometri elemen harus sama dengan parameter model displasemen sebagai berikut :

Geometri elemen:
$$X = \sum_{i=1}^4 N_i x_i$$

$$Y = \sum_{i=1}^4 N_i y_i \quad (C.1)$$

Model displacemen : $u = \sum_{i=1}^4 N_i u_i$

$$v = \sum_{i=1}^4 N_i v_i \quad (C.2)$$

Besarnya shape function (N) untuk titik-titik simpul pada elemen tersebut

adalah :

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{(1-\xi)(1-\eta)}{4} & N_2 &= \frac{(1+\xi)(1-\eta)}{4} \\ N_3 &= \frac{(1+\xi)(1+\eta)}{4} & N_4 &= \frac{(1-\xi)(1+\eta)}{4} \end{aligned} \quad (C.3)$$

Matriks kekakuan elemen

Untuk mendapatkan [k] kita memerlukan [B] yang tidak dapat dinyatakan dalam x dan y sehingga menuliskannya dalam ξ dan η . Hal ini memerlukan transformasi koordinat untuk turunan sebagai berikut. Misalkan ϕ adalah fungsi yang sama dalam x dan y. Kemudian dengan menggunakan aturan berantai (chain rule) akan didapatkan :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \eta} &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (C.4)$$

Dalam bentuk matriks :

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad \text{atau} \quad \begin{Bmatrix} \phi_{,\xi} \\ \phi_{,\eta} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \phi_{,x} \\ \phi_{,y} \end{Bmatrix} \quad (\text{C.5})$$

dimana matriks $[J]$ disebut sebagai matriks Jacobian yang kemudian didefinisikan sebagai matriks transformasi koordinat natural ke koordinat global. Dalam perhitungan elemen isoparametris matriks Jacobian dapat ditulis sebagai berikut :

$$[J] = \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} \quad (\text{C.6})$$

$$[J] = [D_N] \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

$$[D_N] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-\eta) & (1-\eta) & (1+\eta) & -(1+\eta) \\ -(1-\xi) & -(1+\xi) & (1+\xi) & (1-\xi) \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

Untuk mentransformasi pada koordinat Cartesian diperoleh dengan :

$$\begin{Bmatrix} \phi_{,x} \\ \phi_{,y} \end{Bmatrix} = [\Gamma] \begin{Bmatrix} \phi_{,\xi} \\ \phi_{,\eta} \end{Bmatrix} \quad \text{dimana} \quad [\Gamma] = [J]^{-1} \quad (\text{C.9})$$

Untuk menentukan $[B]$ dapat dicari dengan mengalikan (C.9) dengan (C.8)

$$[B] = [\Gamma][D_N] \quad (\text{C.10})$$

Selanjutnya menentukan matriks $[E]$ yang didasarkan pada kondisi plane strain dimana regangan kearah z sama dengan 0.

$$[E] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (C.11)$$

Matriks kekakuannya adalah :

$$[k] = \iint [B]^T [E] [B] dx dy \quad (C.12)$$

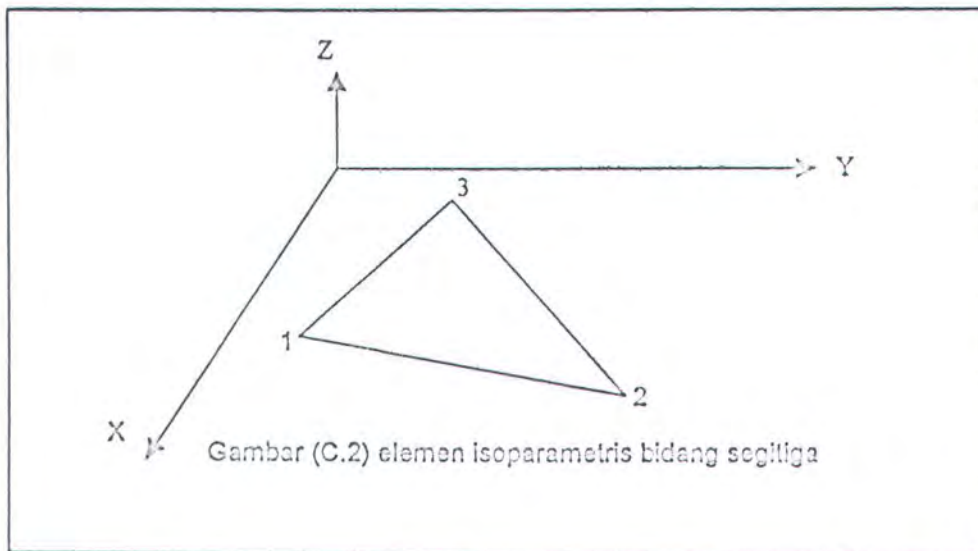
$$= \iint [B]^T [E] [B] J d\xi d\eta \quad (C.13)$$

Matriks massa elemen

$$[m] = [Q \quad Q \quad Q] \quad (C.14)$$

$$[Q] = \frac{\rho A t}{36} \begin{bmatrix} 4 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 4 \end{bmatrix} \quad (C.15)$$

C.2.2. Elemen Bidang Segitiga (Triangular Isoparametric Element)



$$\phi = \sum_{i=1}^3 N_i \phi_i \quad x = \sum_{i=1}^3 N_i x_i \quad y = \sum_{i=1}^3 N_i y_i \quad (C.16)$$

Besarnya shape functions [N] pada titik-titik simpul pada elemen tersebut

adalah : $N_1 = \xi_1 \quad N_2 = \xi_2 \quad N_3 = \xi_3 \quad (C.17)$

Matriks kekakuan elemen

Hubungan antara koordinat alami dan isoparametris adalah :

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \xi \\ \xi_2 &= \eta \\ \xi_3 &= 1 - \xi - \eta \end{aligned} \quad (C.18)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{\partial N_i}{\partial \xi_1} \cdot \frac{\partial \xi_1}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial \xi_2} \cdot \frac{\partial \xi_2}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial \xi_3} \cdot \frac{\partial \xi_3}{\partial \xi} = \frac{\partial N_i}{\partial \xi_1} - \frac{\partial N_i}{\partial \xi_3} \quad (C.19)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \eta} = \frac{\partial N_i}{\partial \xi_1} \cdot \frac{\partial \xi_1}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial \xi_2} \cdot \frac{\partial \xi_2}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial \xi_3} \cdot \frac{\partial \xi_3}{\partial \eta} = \frac{\partial N_i}{\partial \xi_2} - \frac{\partial N_i}{\partial \xi_3} \quad (C.20)$$

$$[D_N] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (C.21)$$

Menghitung $[J]$ lihat persamaan (4.7) kemudian $[\Gamma]$ yang merupakan invers dari $[J]$. Setelah itu dihitung matriks $[B] = [\Gamma][D_N]$. Untuk matriks $[E]$ lihat persamaan (4.2.1.11) maka :

$$[k] = \int_V [B]^T [E][B] dV \quad (C.22)$$

$$[k] = \int_0^1 \int_0^{1-\eta} [B]^T [E][B] J d\xi d\eta$$

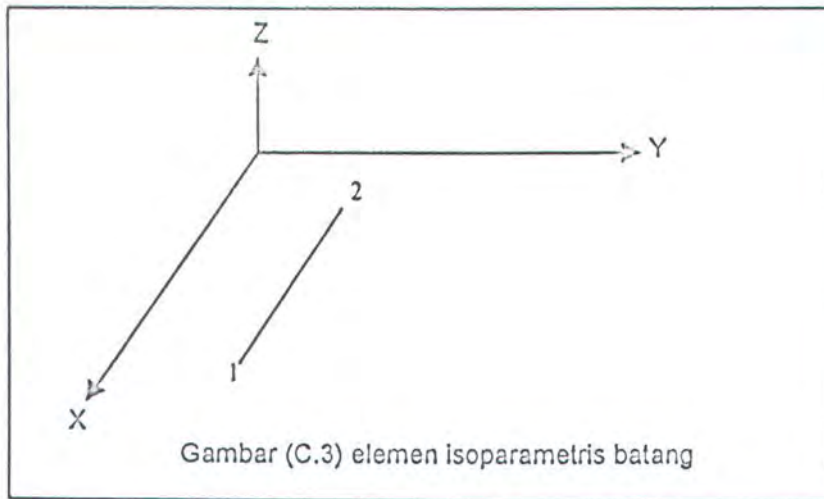
Matriks massa elemen

$$[m] = [Q \quad Q \quad Q] \quad (C.23)$$

$$[Q] = \frac{\rho A l}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (C.24)$$

C.3. Struktur Penegar

Untuk mempresentasikan struktur penegar digunakan tipe elemen beam. Dalam analisa ini dipilih jenis elemen bar dengan asumsi bahwa bending yang terjadi hanya dominan kesatu bidang. Formulasi elemennya yaitu isoparametric bar element dengan dua simpul.



Shape function $[N]$ untuk elemen ini adalah :

$$[N] = \begin{bmatrix} \frac{1-\xi}{2} & \frac{1+\xi}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{C.25})$$

Matriks kekakuan elemen

Berikut membangun matriks $[k]$ untuk batang memerlukan matriks $[B]$ dengan aturan berantai (chain rule).

$$\epsilon = \frac{du}{dx} = \frac{d}{dx} [N] \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad \text{dimana} \quad \frac{d}{dx} = \frac{d\xi}{dx} \frac{d}{d\xi} \quad (\text{C.26})$$

$$J = \frac{dx}{d\xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} [N] \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{C.27})$$

Matriks regangan peralihan adalah :

$$[B] = \frac{d}{dx} [N] = \frac{1}{J} \frac{d}{d\xi} [N] \quad (\text{C.28})$$

Matriks kekakuannya adalah :

$$[k] = \int_0^L [B]^T AE[B] dx = \int_{-1}^1 [B]^T AE[B] J d\xi \quad (C.29)$$

Matriks massa elemen

$$[m] = \frac{\rho At}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (C.30)$$